

Leitung

Stefan Bringezu (WI)

AS2.1: Umweltrelevante metallische Rohstoffe

Dominic Wittmer (WI), Michael Scharp (IZT), Stefan Bringezu (WI),
Michael Ritthoff (WI), Martin Erren (WI), Christoph Lauwigi (Ifeu),
Jürgen Giegrich (ifeu)

AS2.2: Weltweite Wiedergewinnung von PGM

Rainer Lucas (WI), Henning Wilts (WI), Stefan Bringezu (WI)

AS2.3: Materialbestand und Materialflüsse in Infrastrukturen

Sören Steger (WI), Miriam Fekkak (WI), Stefan Bringezu (WI),
Michael Scharp (IZT)

Metallische Rohstoffe, weltweite Wiedergewinnung von PGM und Materialien für Infrastrukturen

Abschlussbericht zu AP2

Abschlussbericht des Arbeitspakets 2 des Projekts
„Materialeffizienz und Ressourcenschonung“ (MaRess)



Kontakt zu den Autor(inn)en:

Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie GmbH
42103 Wuppertal, Döppersberg 19

AS2.1: Dominic Wittmer

Tel.: +49 (0) 202 2492 -181, Fax: -138

Mail: Dominic.Wittmer@wupperinst.org

AS2.2: Rainer Lucas

Tel.: +49 (0) 202 2492 -260, Fax: -138

Mail: Rainer.Lucas@wupperinst.org

AS2.3: Sören Steger

Tel.: +49 (0) 202 2492 -162, Fax: -138

Mail: Sören.Steger@wupperinst.org

„Materialeffizienz und Ressourcenschonung“ (MaRess) – Projekt im Auftrag des BMU I UBA

Projektlaufzeit: 07/2007 – 12/2010

Projektleitung:

Dr. Kora Kristof / Prof. Dr. Peter Henricke

Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie GmbH
42103 Wuppertal, Döppersberg 19

Tel.: +49 (0) 202 2492 -183/-136, Fax: -198/-145

Mail: kora.kristof@wupperinst.org

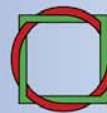
peter.henricke@wupperinst.org

© Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie GmbH

Weitere Informationen zum Projekt

„Materialeffizienz und Ressourcenschonung“ (MaRess)

finden Sie unter **www.ressourcen.wupperinst.org**



Wuppertal Institut
für Klima, Umwelt, Energie
GmbH

Wuppertal Institut in Kooperation mit

BASF

Borderstep

CSCP

Daimler

demea – VDI / VDE-IT

ECN

EFA NRW

FhG IAO

FhG UMSICHT

FU Berlin

GoYa!

GWS

Hochschule Pforzheim

IFEU

Institut für Verbraucherjournalismus

IÖW

IZT

MediaCompany

Ökopol

RWTH Aachen

SRH Hochschule Calw

Stiftung Warentest

ThyssenKrupp

Trifolium

TU Berlin

TU Darmstadt

TU Dresden

Universität Kassel

Universität Lüneburg

ZEW

Gefördert wird das Vorhaben im Rahmen des UFOPLAN
durch das BMU und das UBA, Förderkennzeichen: 3707 93 300

Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung
liegt bei den Autor(inn)en.



Bundesministerium
für Umwelt, Naturschutz
und Reaktorsicherheit

**Umwelt
Bundes
Amt** 
Für Mensch und Umwelt

**Abschlussbericht des AP2
„Metallische Rohstoffe,
weltweite Wiedergewinnung von PGM
und Materialien für Infrastrukturen“**

Inhaltsverzeichnis

- A. Ressourceneffizienzpaper 2.6: „Metallische Rohstoffe, weltweite Wiedergewinnung von PGM und Materialien für Infrastrukturen“ (Deutsche Zusammenfassung, Dezember 2010)**
- B. Ressourceneffizienzpaper 2.7: „Metallic Raw Materials, Worldwide Recovery of PGM and Materials for Infrastructures “ (Englische Zusammenfassung, Dezember 2010)**
- C. Ressourceneffizienzpaper 2.1: „Umweltrelevante metallische Rohstoffe“ Teil 1: Abschlussbericht (Meilenstein zu AS2.1, November 2011)**
- D. Ressourceneffizienzpaper 2.2: „Umweltrelevante metallische Rohstoffe“ Teil 2: Untersuchungen zu ausgewählten Metallen: Gallium, Gold, Indium, Mangan, Nickel, Palladium, Silber, Titan, Zink, Zinn (Meilenstein zu AS2.1, November 2011)**
- E. Ressourceneffizienzpaper 2.3: „Weltweite Wiedergewinnung von PGM“ (Meilenstein zu AS2.2, September 2011)**
- F. Ressourceneffizienzpaper 2.4: „Materialbestand und Materialflüsse in Infrastrukturen“ (Meilenstein zu AS2.3, Juli 2011)**

G. Ressourceneffizienzpaper 2.5: „Materialbestand und Materialflüsse der IuK-Infrastrukturen: Mobilfunk“ (Meilenstein zu AS2.3, Juli 2011)

Dr. Dominic Wittmer¹
Dr. Michael Scharp²
Dr. Stefan Bringezu¹
Michael Ritthoff¹
Martin Erren¹
Christoph Lauwigi³
Jürgen Giegrich³

¹ Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie GmbH

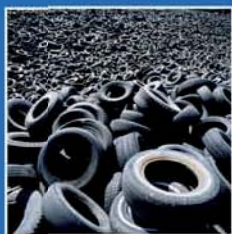
² Institut für Zukunftsstudien und Technologiebewertung

³ Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg

Umweltrelevante metallische Rohstoffe

Meilensteinbericht des Arbeitsschrittes 2.1 des Projekts
„Materialeffizienz und Ressourcenschonung“ (MaRess)

Teil 1: Abschlussbericht



Kontakt zu den Autor(inn)en:

Dominic Wittmer

Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie GmbH
Döppersberg 19, 42103 Wuppertal

Tel.: +49 (0) 202 2492 -181, Fax: -138
Mail: dominic.wittmer@wupperinst.org

**„Materialeffizienz und Ressourcenschonung“
(MaRes) – Projekt im Auftrag des BMU | UBA**

Projektlaufzeit: 07/2007 – 12/2010

Projektleitung:

Dr. Kora Kristof / Prof. Dr. Peter Hennicke

Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie GmbH
42103 Wuppertal, Döppersberg 19

Tel.: +49 (0) 202 2492 -183 / -136, Fax: -198 / -145

Mail: kora.kristof@wupperinst.org
peter.hennicke@wupperinst.org

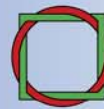
© Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie GmbH

Weitere Informationen zum Projekt

„Materialeffizienz und Ressourcenschonung“ (MaRes)
finden Sie unter **www.ressourcen.wupperinst.org**

Gefördert wird das Vorhaben im Rahmen des UFOPLAN
durch das BMU und das UBA, Förderkennzeichen: 3707 93 300

Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung
liegt bei den Autor(inn)en.



Wuppertal Institut
für Klima, Umwelt, Energie
GmbH

**Wuppertal Institut
in Kooperation mit**

BASF
Borderstep
CSCP
Daimler
demea – VDI / VDE-IT
ECN
EFA NRW
FhG IAO
FhG UMSICHT
FU Berlin
GoYa!
GWS
Hochschule Pforzheim
IFEU
Institut für Verbraucherjournalismus
IÖW
IZT
MediaCompany
Ökopol
RWTH Aachen
SRH Hochschule Calw
Stiftung Warentest
ThyssenKrupp
Trifolium
TU Berlin
TU Darmstadt
TU Dresden
Universität Kassel
Universität Lüneburg
ZEW



Bundesministerium
für Umwelt, Naturschutz
und Reaktorsicherheit

**Umwelt
Bundes
Amt** 
Für Mensch und Umwelt

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	11
1.1	Das Projekt Materialeffizienz und Ressourcenschonung	11
1.2	Ziele	12
1.3	Vorgehen	12
1.4	Struktur des Berichts	14
2	Seltenheit und Umweltrelevanz von Metallen	15
2.1	Vorgehen zur Bestimmung von Seltenheit und Umweltrelevanz	15
2.2	Begriffsbestimmung „seltene Metalle“	16
2.2.1	Kriterium 1: Reservenmenge	21
2.2.2	Kriterium 2: Statische Reichweite	22
2.2.3	Kriterium 3: Jährliche Produktionsmenge	25
2.2.4	Kriterium 4: Rohstoffpreis und Rohstoffpreisentwicklung	27
2.2.5	Kriterien 5 und 6: Geographische Konzentration der globalen Reserven und der globalen Primärproduktion	35
2.2.6	Kriterium 7: Feinverteilung von Metallen	42
2.3	Begriffsbestimmung „umweltrelevante Metalle“	48
2.3.1	Inputindikatoren	49
2.3.2	Outputindikatoren	51
3	Einsatz von Metallen in den Bereichen Elektro- und Elektronikprodukte, Medizin und Nanotechnologie	53
3.1	Metalle in Elektro- und Elektronikprodukten	53
3.2	Metalle in der Medizintechnik	55
3.3	Metalle in Nanotechnologien	59
4	Auswahl von Metallen zur vertiefenden Untersuchung	65
4.1	Kriterienauswahl zur Bestimmung „Seltener Metalle“	65
4.2	Kriterienauswahl zur Bestimmung der „Umweltrelevanz“	70
4.3	Auswahl der Metalle	71

5	Vertiefende Untersuchungen ausgewählter Metalle	77
5.1	Ziel der Untersuchungen	77
5.2	Methode	77
5.2.1	Systemdefinition: Umfang und Auflösung der Untersuchungen	79
5.2.2	Struktur der Untersuchungen	80
5.2.3	Gegenstand der Untersuchungen	82
5.3	Ergebnisse	83
5.4	Übersicht zu Umweltbelastungen und Materialverluste der zehn Metalle	83
5.4.1	Gallium	89
5.4.2	Gold	89
5.4.3	Indium	90
5.4.4	Mangan	91
5.4.5	Nickel	91
5.4.6	Palladium	92
5.4.7	Silber	93
5.4.8	Titan	93
5.4.9	Zink	94
5.4.10	Zinn	95
5.5	Diskussion der Ergebnisse	95
5.5.1	Methodische Einschränkungen	95
5.5.2	Zusammenfassende Bewertung der Untersuchungen zu den zehn Metallen	97
6	Handlungsoptionen	105
7	Abkürzungsverzeichnis	109
7.1	Metalle / Chemische Elemente	109
7.2	Physikalische Einheiten	109
7.3	Weitere Abkürzungen	111
8	Glossar	115
9	Referenzen	121

10	Anhang	125
10.1	Anhang 1 – Produktions- und Reservenmengen der Metalle	125
10.2	Anhang 2 – Anwendungen, feinverteilter Metalleinsatz und dissipative Verwendung	167
10.3	Anhang 3 – Einsatz von Metallen in ausgewählten Anwendungsbereichen	185
10.4	Anhang 4 – Thematische Überblicke über dissipative Verwendung und feinverteilten Einsatz von Metallen	207

Abbildungsverzeichnis

- Abb. 2-1: Umfang des Metallscreenings in Phase I: Alle Elemente abzüglich der Nichtmetalle und der instabilen Metalle. _____ 16
- Abb. 2-2: Preisentwicklung von Selen, Tantal und Indium im Verlauf des 20. Jahrhunderts. Angaben in konstanten US\$ pro Tonne (1998 = 100). Quelle: Eigene graphische Darstellung nach USGS Historical Statistics: Selenium/2004, Tantalum/2002, Indium/2004. Anmerkung: Die Preise sind auf den US-amerikanischen Markt bezogen. _____ 29
- Abb. 2-3: Preisentwicklung von Niob und Kupfer im Verlauf des 20. Jahrhunderts. Angaben in konstanten US\$ pro Tonne (1998 = 100). Quelle: Eigene graphische Darstellung nach USGS Historical Statistics: Columbium/2002, Copper/2004. Anmerkung: Die Preise sind auf den US-amerikanischen Markt bezogen. _____ 30
- Abb. 3-1: Einsatz von Metallen in EuE-Produkten (Stand 2008). Die Metalle sind entsprechend der qualitativen Wichtigkeit farblich gekennzeichnet. Die Kürzel unterhalb der Elementsymbole bezeichnen die Haupteinsatzfelder der Metalle. _____ 55
- Abb. 3-2: Einsatz von Metallen in der Medizintechnik. Die qualitative Bedeutung der Metalle ist farblich gekennzeichnet. _____ 59
- Abb. 3-3: Einsatz von Metallen in der Nanotechnologie. Die qualitative Bedeutung der Metalle ist farblich gekennzeichnet. _____ 64
- Abb. 4-1: Darstellung der Auswahlkriterien für die Metalle (Darstellung nicht vollständig). Die Farben unterlegen die Bedeutung auf einer farbigen Ordinalskala (rot am bedeutendsten). Dissipative Verwendung (Feinverteilung): „ja: dissipative Produktnutzung; „?“: dissipativ verwendet als Legierungsmetall; „ja?“. dissipative Produktnutzung vermutet; „(ja)“:dissipativ genutzt, begründet durch feine Verteilung von bzw. in Produkten; „+/-“: nicht feinverteilt, sogenannter „Grenzfall“. RUS: Russland; ZA: Südafrika. _____ 71

Tabellenverzeichnis

Tab. 2-1: Klassifizierung der Metalle mithilfe des Kriteriums „Reservenmenge“.	22
Tab. 2-2 Statische Reichweite von Tantal: Entwicklung von Produktionsmenge, Reservenmenge und statischer Reichweite im Zeitraum 1996-2008 (USGS, diverse Jahrgänge), Das Jahr gibt den Zeitpunkt der Veröffentlichung durch USGS an. Als statische Reichweite für den Gesamtzeitraum (letzte Zeile) wird der Mittelwert der statischen Reichweiten der diversen Jahre angegeben. * = eigene Annahme bzw. eigene Berechnung.	23
Tab. 2-3: Klassifizierung der Metalle mithilfe des Kriteriums „statische Reichweite“ (USGS 2008).	25
Tab. 2-4: Klassifizierung der Metalle mithilfe des Kriteriums „jährliche Produktionsmenge“	26
Tab. 2-5: Entwicklung von Metallpreisen für den Zeitraum 2004-2007; Preise 2007 sind geschätzt. Zur besseren Vergleichbarkeit der Preise wurden die originalen Preisangaben mit Mengenbezugsgrösse (angegeben auf Englisch) umgerechnet in Preise pro Kilogramm. Quelle: USGS (2008).	32
Tab. 2-6: Kriterien zur Bewertung von Risiken eines Versorgungsausfalls (BMW 1999)	36
Tab. 2-7: Klassifizierung der Metalle mithilfe der Kriterien „geographische Konzentration der Produktion“ bzw. „geographische Konzentration der Reserven“	38
Tab. 2-8: Geographische Konzentration der Produktion und der Reserven (ohne Berücksichtigung von Sekundärressourcen). Für Arsen, Barium, Calcium, Kalium, Lithium, Magnesium, Natrium wurden die relevanten Salze betrachtet und nicht die Metalle, die überwiegend in sehr geringen Mengen produziert werden (vgl. Anhang 1).	39
Tab. 2-9: Geographische Konzentrationen der Reserven und der Produktion von Metallen	41

Tab. 2-10: Anwendungsbereiche der Metalle mit deutlich feinverteiltem Einsatz: Angabe des Massenanteils in den diversen Anwendungsbereichen. Bezugsjahr 2007 (wenn nicht anders angegeben)	45
Tab. 2-11: Klassifizierung der Metalle nach feinverteiltem Einsatz. Dunkelgrau sind jene Metalle dargestellt, bei denen der feinverteilte Einsatz deutlich ausgeprägt ist im Vergleich zu den anderen Metallen; Metalle mit „dissipativer Produktnutzung“ sind kursiv dargestellt.	48
Tab. 3-1: Einsatz von Metallen in der Medizintechnik mit Angabe nach Einsatzfeldern. Sofern in der Diagnostik oder Strahlentherapie Isotope verwendet werden, sind diese mit Massenzahl der Metalle ausgewiesen. Unbestimmt: keine Einsatzfelder dokumentiert	56
Tab. 4-1: Übersicht der Klassifizierung der diversen Kriterien. Die Bezeichnung der Kategorien (Klassen) wurde vereinheitlicht.	66
Tab. 4-2: Argumente pro und contra zu den Kriterien für die Auswahl der vertiefend zu untersuchenden seltenen Metalle.	67
Tab. 5-1: Überblick der zehn Metalluntersuchungen.	83
Tab. 10-1: Produktion und Reserven von Metallen: Tabellen pro Metall nach Ländern	126
Tab. 10-2: Weltweite Produktionsmengen, Reservemengen und statische Reichweite von Metallen, jeweils bezogen auf das Jahr 2007; die statische Reichweite wurde durch Division der Reserven durch die Produktionsmengen berechnet	151
Tab. 10-3: Geographische Konzentration der weltweiten Produktion (Primärproduktion) und der Reserven	161
Tab. 10-4: Einsatz von Metallen in den Anwendungsbereichen Elektro- und Elektronikprodukte sowie Informations- und Kommunikationstechnologie	185
Tab. 10-5: Einsatz von Metallen im Anwendungsbereich Medizin	191

Tab. 10-6: Einsatz von Metallen als Zusatzstoffe bei der Herstellung von Stahllegierungen (2007), bezogen auf den gesamten Einsatz des Metalls in den Vereinigten Staaten bzw. weltweit. Die erläuternden Begriffe, die hinter den Prozentzahlen angeführt sind, beschreiben den Einsatz so genau als möglich und sind daher nicht systematisch begründet _____	207
Tab. 10-7: Einsatz von Metallen zur Herstellung von Legierungen (inkl. Stahllegierungen) und zur Oberflächenbeschichtung, bezogen auf den gesamten Einsatz des Metalls in den Vereinigten Staaten bzw. weltweit. Daten für 2007 sofern nicht anders angegeben _____	208
Tab. 10-8: Einsatz von Metallen in Katalysatoren, bezogen auf den gesamten Einsatz des Metalls in den Vereinigten Staaten bzw. weltweit. Bezugsdatum 2007 sofern nicht anders angegeben. _____	209
Tab. 10-9: Einsatz ausgewählter Metalle mit dissipativer Nutzung und Verbrauch, bezogen auf den gesamten Einsatz des Metalls in den Vereinigten Staaten. Datenbasis für die Vereinigten Staaten, bezogen auf das Jahr 2007 _____	210
Tab. 10-10: Dissipative Nutzung von Metallen in EuE-Produkten, bezogen auf den gesamten Einsatz des Metalls in den Vereinigten Staaten bzw. weltweit. Bezugsjahr 2007 soweit nicht anders angegeben. _____	211
Tab. 10-11: Pigmente, Kunststoffstabilisierer und chemische Nutzungen der Metalle, bezogen auf den gesamten Einsatz des Metalls in den Vereinigten Staaten bzw. weltweit. Bezugsjahr 2007 soweit nicht anders angegeben _____	212
Tab. 10-12: Einsatz ausgewählter Metalle in der Glasindustrie, bezogen auf den gesamten Einsatz des Metalls weltweit bzw. in den Vereinigten Staaten. Bezugsjahr: 2007, sofern nicht anders angegeben _____	213
Tab. 10-13: Metalle in der Schmuckindustrie, wo möglich bezogen auf die gesamte Verwendung des Metalls in den Vereinigten Staaten bzw. weltweit. Bezugsjahr 2007 soweit nicht anders angegeben. _____	213

1 Einleitung

1.1 Das Projekt Materialeffizienz und Ressourcenschonung

Der vorliegende Bericht fasst die Ergebnisse aus dem Arbeitsschritt „Umweltrelevante metallische Rohstoffe“ zusammen, die im Rahmen des Projektes „Materialeffizienz und Ressourcenschonung“ (MaRess)¹ erarbeitet wurden.

Ziel des Forschungsprojektes MaRess ist es, substantielle Wissensfortschritte zu vier Kernfragen für die Steigerung der Materialeffizienz und für die Verbesserung der Ressourcenschonung zu erreichen. Das Projekt untersuchte folgende vier Schwerpunkte:

- Ermittlung der Potenziale der Ressourceneffizienzsteigerung.
- Entwicklung von Ansätzen für zielgruppenspezifische Ressourceneffizienzpolitiken.
- Erreichen von neuen Erkenntnissen hinsichtlich der Wirkungsanalyse auf gesamt- und betriebswirtschaftlicher Ebene.
- Wissenschaftliche Begleitung der Umsetzungsaktivitäten und des Agenda Setting sowie Kommunikation der Ergebnisse mit den Zielgruppen.

Das Projekt besteht aus insgesamt 14 Arbeitspaketen, die den vier Bereichen "Potenziale der Ressourceneffizienzsteigerung", "Zielgruppenspezifische Ressourceneffizienzpolitik", "Wirkungsanalyse" und "Konkrete Umsetzung, Agenda-Setting, Verbreitung der Ergebnisse" zugeordnet sind. Hintergründe sowie Projektberichte sind auf der Projekthomepage zu finden².

Das Arbeitspaket 2 „Metallische Rohstoffe, PGM, Infrastrukturen“ ist Teil des Bereichs „Potenziale der Ressourceneffizienzsteigerung“ und gliedert sich in die drei Teile „Umweltrelevante metallische Rohstoffe“, „Weltweite Wiedergewinnung von PGM“ und „Materialbestand und Materialflüsse in Infrastrukturen“. Sie zielen jeweils auf bestimmte thematische Facetten der Frage nach den Potenzialen zur Steigerung der Materialeffizienz bzw. Ressourcenschonung. Dabei geht es primär darum,

¹ Umweltforschungsplan des Bundesumweltministeriums, FKZ 3707 93 300

² Die Adresse der MaRess-Homepage lautet <http://ressourcen.wupperinst.org/home/index.html>

naturwissenschaftliche und technische Grundlagen für die anderen Arbeitspakete in MaRes bereitzustellen und so Beurteilungen der Umweltrelevanz der eingesetzten Material- und Ressourcenmengen zu unterstützen.

1.2 Ziele

Gegenstand des Arbeitsschrittes 2.1 ist die Verbesserung der Wissensbasis zu den Stoffflüssen seltener umweltrelevanter Metalle, um Handlungsbedarf und Handlungsoptionen bezüglich ihrer Bewirtschaftung beurteilen zu können. Ein zentrales Etappenziel dabei ist die Bereitstellung geeigneter Informationen über den Ist-Zustand der Umweltbelastungen und Materialverluste entlang den Lebenszyklen der Metalle. Dabei sind die selteneren Metalle und entsprechend weniger untersuchten explizit inbegriffen.

Zudem ist es Ziel, einen Überblick über den Einsatz der verschiedenen Metalle in den Anwendungsfeldern Elektrotechnik- und Elektronikindustrie (EuE, inklusive Informations- und Kommunikationstechnologien und Photovoltaiktechnologie), Medizintechnik (Med) und Nanotechnologie (Nano) zu gewinnen, um die Entwicklung von Strategien und Maßnahmen bezüglich Vermeidung, Substitution, ressourcenschonender Produktion und Kreislaufschließung (inkl. internationaler Aspekte) zu unterstützen.

Die Informationen dienen der Analyse des Handlungsbedarfs und der Handlungsoptionen, insbesondere politischer Art, in Bezug auf metallische Stoffströme.

1.3 Vorgehen

Aufgrund der Vielzahl an Metallen, die heute in der Elektrotechnik- und Elektronikindustrie, in der Medizintechnik und in der Nanotechnologie eingesetzt werden, wurde eine Fokussierung auf ausgewählte Metalle vorgenommen. In einer ersten Phase wurden zur Auswahl dieser Metalle Kriterien erarbeitet und mit Daten hinterlegt. Auf dieser Basis erfolgte die Auswahl von zehn Metallen, die in einer vertiefenden Betrachtung untersucht wurden. In einer zweiten Phase standen die Umweltbelastungen und die Materialverluste im Zentrum dieser Arbeit. Die Befunde daraus wurden schließlich in einer dritten Phase verallgemeinert beziehungsweise in einen Gesamtzusammenhang gesetzt, so dass man einen Überblick über Handlungsbedarf und insbesondere politische Handlungsoptionen hinsichtlich metallischer Stoffströme erhält.

Entsprechend wurde der Arbeitsschritt 2.1 in folgende drei Arbeitsphasen unterteilt:

Phase I: Screening der Metalle nach Seltenheit und Umweltrelevanz und Auswahl von zehn potentiell problematischen Metallen.

Phase II: Vertiefende Betrachtung der ausgewählten potentiell problematischen Metalle sowie Übersicht der Materialverluste und Umweltbelastungen zu den vertieft betrachteten Metallen.

Phase III: Ausblick auf Handlungsoptionen zur Erhöhung der Materialeffizienz.

In Phase I wurde ein ausführliches Screening der Metalle durchgeführt, um einen Überblick über das Spektrum von Umweltrelevanz, Verfügbarkeit und der Einsatzgebiete der Metalle zu erhalten und auf dieser Basis geeignete Metalle zur vertiefenden Betrachtung zu bestimmen. In Phase II wurden diese Metalle vertiefend untersucht hinsichtlich der bekannten Umweltbelastungen und Materialverluste über den Lebensweg. In einem letzten Schritt (Phase III) werden prinzipielle Handlungsoptionen zur Umsetzung des Verbesserungspotentials vorgestellt.

Zu Beginn wurde ein breit angelegtes Screening der Metalle nach diversen Kriterien durchgeführt. Das Screening dient dem Überblick über die Vielzahl der Metalle anhand mehrerer Kriterien, die einerseits zur Auswahl der vertiefenden Betrachtung genutzt werden können, andererseits die Wissensbasis erweitern sollen.

Die Übersicht umfasst:

- Bestimmung der Einsatzbereiche der Metalle (Kap. 3);
- Angabe der Größenordnung der eingesetzten Metallmengen hinsichtlich ausgewählter Anwendungen (Kap. 3, Kap. 10.2, Kap. 10.3);
- Ranking der Metalle (Einsatzmengen und -muster, Umweltbelastungen, Trends der Nachfrage) (Kap. 4);
- Angaben zu weltweiter Produktionsmenge, Reservenmenge und statischer Reichweite der Metalle nach Ländern (Kap. 10.1);
- Geographische Konzentration der weltweiten Primärproduktion (Kap. 10.1);
- Unterscheidung nach dissipativen und nicht dissipativen Anwendungen (Kap. 10.2).

Der Blick wurde dabei auf jene Metalle gerichtet, von denen anzunehmen ist, dass ihre Gewinnung, Nutzung oder Entsorgung relevante Umweltauswirkungen haben. Entsprechend den aktuellen Entwicklungen auf dem globalen Metallmarkt wurden Hinweise auf mögliche Verknappung von Metallen sowie zukünftig steigende Bedarfe als zusätzliches Auswahlkriterium aufgenommen, da diese für eine uneingeschränkte nachhaltige Entwicklung von Bedeutung sein kann.

Durch Auswahl von zehn potenziell problematischen Metallen wurde die Untersuchung fokussiert. Es wurden vereinfachte Stoffflussanalysen durchgeführt, anhand derer die Umweltbelastungen und Materialverluste über den Lebensweg qualifiziert und soweit möglich quantifiziert wurden. Dies schloß ausdrücklich die Bearbeitung der Erze zu den Metallen ein.

1.4 Struktur des Berichts

Der vorliegende Abschlussbericht fasst die Ergebnisse des Arbeitsschrittes 2.1 „Umweltrelevante metallische Rohstoffe“ zusammen. Der Bericht hat folgende Struktur:

In Kapitel 1 werden die Ziele der Studie vorgestellt und das Vorgehen erläutert.

In Kapitel 2 werden die Themenfelder Seltenheit und Umweltrelevanz untersucht: Nach Definition relevanter Begriffe folgt die Analyse derjenigen Kriterien, die einen inhaltlichen Bezug zu Seltenheit und Umweltrelevanz der Metalle aufweisen. Hierfür wurden die erforderlichen Daten recherchiert und aufbereitet.

In Kapitel 3 werden die drei Sektoren Elektrotechnik- und Elektronikindustrie, Medizintechnik und Nanotechnologie hinsichtlich des Einsatzes von Metallen untersucht, da sie in Bezug auf den heutigen Einsatz von seltenen umweltrelevanten Metallen als relevant erachtet werden und zudem beträchtliches WachstumsPotenzial aufweisen. Auf Basis einer Literaturrecherche wurde für jeden der drei Sektoren die Relevanz der einzelnen Metalle eingeschätzt.

In Kapitel 4 wird das Verfahren zur Auswahl der Metalle erläutert, die in Phase II vertiefend untersucht wurden, wobei die Kriterien zur Auswahl der Metalle diskutiert und angewendet werden. In Kapitel 5 wird das Vorgehen zur Erarbeitung der zehn vertiefenden Studien zu ausgewählten Metallen erläutert. Weiterhin erfolgt eine Zusammenfassung der Ergebnisse aus den zehn Studien.

Kapitel 6 gibt schließlich einen Überblick über Handlungsoptionen im Zusammenhang mit den untersuchten Metallen.

2 Seltenheit und Umweltrelevanz von Metallen

Zu den Metallen werden ca. 80 % der Elemente gezählt. Im Periodensystem der Elemente liegen sie unterhalb einer diagonalen Trennungslinie, wobei der Übergang zu den Nichtmetallen über die Halbmetalle fließend ist. Die vorliegende Studie bezieht sich auf diese elektrochemisch begründete Definition.

2.1 Vorgehen zur Bestimmung von Seltenheit und Umweltrelevanz

Zunächst wurden die Begriffe „Seltenheit“ und „Umweltrelevanz“ im Zusammenhang mit den Zielen dieser Arbeit bestimmt, um das folgende Screening zielgerichtet durchführen zu können.

Das Screening der Phase I umfasste eine Literaturrecherche mit dem Ziel, vordefinierte Kriterien für die untersuchten Metalle übersichtlich zusammenzustellen, um eine Zusammenschau diskutieren zu können. Zur Begrifflichkeit „Seltenheit“ wurden sieben Kriterien untersucht, das sind: Reservenmenge, statische Reichweite, jährliche Produktionsmenge, Rohstoffpreis, geographische Konzentration der Produktion und der Reserven sowie die Feinverteilung von Metallen (Kap. 2.2)³. Zur Begrifflichkeit der Umweltrelevanz sind für das Screening der Kumulierte Energieaufwand (KEA), der kumulierte Rohstoffaufwand (KRA), sowie der Globale Materialaufwand (englisch: Total Material Requirement, TMR) verwendet worden (Kap. 2.3).

Im Verlauf des Metallscreenings wurden alle Elemente abzüglich der Nichtmetalle und der instabilen Metalle untersucht; das bedeutet eine Betrachtung von bis zu 65 Metallen und Halbmetallen bzw. Metallgruppen (63 Metalle⁴ plus Platingruppenmetalle und seltene Erden)⁵.

³ In einer Planungsphase sollten die Kriterien Rezyklierbarkeit und Substituierbarkeit als zusätzliche Auswahlkriterien verwendet werden. Da diese sich jedoch auf die Produktebene beziehen, konnten sie nicht im Rahmen des Metallscreenings eingesetzt werden. Im Allgemeinen bedingt die Vielfalt der Funktionalität eines Metalls den Einsatz in sehr vielfältigen Produkten.

⁴ Ziel war, das Screening auf möglichst alle in Frage kommenden Metall auszudehnen, um eine ungewollte Vorauswahl zu verhindern. Daher wurden alle stabilen metallischen und halbmatalischen Elemente eingeschlossen; instabile, radioaktive Elemente bzw. technisch irrelevante Elemente wurden ausgeschlossen, namentlich die Actinoide (Urangruppe und Transurane), Francium (Alkalimetall), Radium (Erdalkalimetall), Polonium (Sauerstoffgruppe) und Technetium. Einbezogen sind die klassischen Halbmetalle wie Germanium, Arsen, Selen und Tellur.

⁵ Für die Platingruppenmetalle und für die seltenen Erden liegen in der Literatur häufig kumulierte Ergebnisse zu den Metallgruppen vor.

Abb. 2-1: Umfang des Metallscreenings in Phase I: Alle Elemente abzüglich der Nichtmetalle und der instabilen Metalle.

Metallscreening: Betrachtete Metalle																	
<div> <div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> </div> <div> Metalle (in das Screening einbezogen) Halbmetalle (in das Screening einbezogen) Instabile Metalle Nichtmetalle </div> </div>																	
Li	Be																
Na	Mg																
K	Ca	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Ge	As	Se		
Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Mo	Tc	Ru	Rh	Pd	Ag	Cd	In	Sn	Sb	Te		
Cs	Ba	Lan- thani- s.u.	Hf	Ta	W	Re	Os	Ir	Pt	Au	Hg	Tl	Pb	Bi	Po		
Fr	Ra	Actin- iden s.u.															
La	Ce	Pr	Nd	Pm	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu			
Ac	Th	Pa	U	Np	Pu	Am	Cm	Bk	Cf	Es	Fm	Md	No	Lr			

2 / 13

2.2 Begriffsbestimmung „seltene Metalle“

Im allgemeinen Sprachgebrauch wird der Begriff „selten“ genutzt, um eine geringe Häufigkeit eines Objekts im Verhältnis zu anderen Objekten zu beschreiben. Allerdings kann sich die Seltenheit auf verschiedene Eigenschaften bzw. Größen beziehen – mit entsprechend unterschiedlicher Bedeutung.

Es ist demnach charakteristisch, dass diese „Relativierung“ für spezifische Eigenschaften unterschiedlich zu interpretieren ist. Notwendiger Bestandteil der Definition von „selten“ ist „in geringem Umfang vorkommend“, jedoch ist dies nicht hinreichend. Dieser Sachverhalt wird anhand der Verteilung der Elemente in der Erdkruste dargestellt (Tab. 2-1).

Tab. 2-1: Durchschnittliche Häufigkeit der Elemente in der Erdkruste nach Rutherford (2006); (*): Hoppe (2011). Die Elemente sind in absteigender Reihenfolge der Häufigkeit angeordnet.

Rang	Name	ppm	Rang	Name	ppm	Rang	Name	ppm	Rang	Name	ppm
1	Sauerstoff	474.000	25	Cer	68	49	Zinn	2,2	73	Ruthenium	0,0010
2	Silicium	277.000	26	Kupfer	50	50	Europium	2,1	74	Platin	0,0010
3	Aluminium	82.000	27	Neodym	38	51	Tantal	2,0	75	Palladium	0,0006
4	Calcium	41.000	28	Lanthan	32	52	Germanium	1,5	77	Rhenium	0,0004
5	Eisen	41.000	29	Yttrium	30	53	Molybdän	1,5	78	Rhodium	0,0002
6	Natrium	23.000	30	Stickstoff	25	54	Holmium	1,4	79	Osmium	0,0001
7	Magnesium	23.000	31	Lithium	20	55	Argon	1,2	80	Neon	0,00007
8	Kalium	21.000	32	Cobalt	20	56	Terbium	1,1	81	Krypton	0,00001
9	Titan	5.600	33	Niob	20	57	Wolfram	1,0	82	Iridium	0,000003
10	Wasserstoff	1.520	34	Gallium	18	58	Thallium	0,60	83	Xenon	0,000002
11	Phosphor	1.000	35	Scandium	16	59	Lutetium	0,51	85	Radium	0,0000006
12	Fluor	950	36	Blei	14	60	Thulium	0,48	86	Promethium	geringe Spuren
13	Mangan	950	37	Thorium	12	61	Brom	0,37	87	Polonium	
14	Barium	500	38	Bor	10	62	Antimon	0,20	88	Radon	
15	Kohlenstoff	480	39	Praseodym	9,5	63	Iod	0,14	89	Actinium	
16	Strontium	370	40	Samarium	7,9	64	Cadmium	0,11	90	Protactinium	
17	Schwefel	260	41	Gadolinium	7,7	65	Silber	0,07	91	Plutonium	
18	Zirkonium	190	42	Dysprosium	6,0	66	Selen	0,05	92	Astat	
19	Vanadium	160	43	Ytterbium	5,3	67	Quecksilber	0,05	93	Francium	$1 \cdot 10^{-17} (*)$
20	Chlor	130	44	Erbium	3,8	68	Indium	0,0490	94	Neptunium	$4 \cdot 10^{-13} (*)$
21	Chrom	100	45	Hafnium	3,3	69	Bismut	0,0480			
22	Rubidium	90	46	Cäsium	3,0	70	Helium	0,0080			
23	Nickel	80	47	Beryllium	2,6	71	Tellur	0,0050			
24	Zink	75	48	Uran	2,4	72	Gold	0,0011			

In der Natur treten Metalle in Form von Mineralien auf; lediglich die Edelmetalle kommen teils gediegen (in metallischer Form) vor. Unter dem Begriff Mineralien werden über 4.000 Stoffe subsumiert, die durch natürliche, meist anorganische Vorgänge gebildet werden. Die Mineralien bilden damit den Ausgangspunkt der Verhüttung.

Zunächst sollten jedoch Metalle im Sinne des Periodensystems betrachtet werden, einerseits um die Thematik einfacher zu strukturieren, andererseits um der Tatsache gerecht zu werden, dass diese Stoffe in der Produktion und den Endanwendungen überwiegend in metallischer Form genutzt werden. Zwar sind Metalle nach obiger Definition auch Bestandteil von beispielsweise Baustoffen, doch eine Nutzung in mineralischer (nicht-metallischer) Form korreliert in der Regel mit deutlich geringeren relativen Umweltbelastungen.

Das häufigste Metall der Erdkruste⁶ ist Aluminium mit 6,5 %, es folgen Natrium (2,6 %), Calcium (1,9 %), Eisen (1,9 %), Magnesium (1,8 %), Kalium (1,4 %) und Titan (0,2 %) (Angaben in Atomprozent) (nach Matthes 1993). Diese acht Metalle bilden damit insgesamt 16,2 % der Erdkruste. Hinsichtlich der Verteilung nach Gewichtsprozenten erhält man größere Anteile der Metalle (verglichen mit der Verteilung nach Atomprozenten)⁶, so dass Aluminium mit 8,1 % das gewichtigste Metall ist und Eisen (5,0 %), Calcium (3,6 %), Natrium (2,8 %), Kalium (2,6 %) und Magnesium (2,1 %) folgen (nach Matthes 1993).

In der Abfolge der Häufigkeit folgen Mangan, Barium Strontium, Zirkonium, Vanadium, Chrom, Rubidium, Nickel, Zink, Cer, Kupfer und einige Seltenerdmetalle. Allerdings erlauben diese Häufigkeiten keine direkten Schlüsse darauf, welche Mengen an diesen Metallen gewonnen werden können, da ihr prozentualer Anteil am Aufbau der Erdkruste keine direkten Aussagen über ihre Konzentration unter bestimmten mineralogischen Bedingungen zulässt. Beispielsweise ist Gold ähnlich selten wie Platin, jedoch ist die Gewinnung von Platin mit ungleich höherem Aufwand als Gold verbunden, unter anderem da es in seinen Vorkommen deutlich geringere Konzentrationen aufweist.

Die Bestimmung des Begriffs „seltene Metalle“ erfordert demnach eine angemessene Diskussion. Die Vielfalt des Begriffs spiegelt sich in den folgenden sieben Kriterien wieder, deren verschiedene Ansätze hinsichtlich Begriffsbestimmung geprüft werden:

⁶ Sauerstoff und Silizium machen zusammen 84 Atomprozent bzw. 74 Gewichtsprozent der Erdkruste aus.

- Kriterium 1: Reservenmenge: Metalle mit geringen Reserven;
- Kriterium 2: statische Reichweite: Metalle mit geringer statischer Reichweite;
- Kriterium 3: Jährliche Produktionsmenge: Metalle mit geringer Produktionsmenge;
- Kriterium 4: Rohstoffpreis: Metalle mit hohem Preis;
- Kriterium 5: Konzentration der Produktion: Metalle mit hoher geographischer Konzentration der Produktionsländer;
- Kriterium 6: Konzentration der Reserven: Metalle mit hoher geographischer Konzentration der Länder, in denen sich die Reserven befinden;
- Kriterium 7: Feinverteilung von Metallen

In der Literatur und bei verschiedenen Institutionen existieren unterschiedliche Auffassungen darüber, welche Metalle als „selten“ oder „knapp“ zu bezeichnen sind. In diversen Studien werden „seltene Metalle“ (englisch: *rare metals*) zunehmend thematisiert. So hat das Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie im Jahr 1999 eine Studie herausgegeben mit dem Ziel, die Auswirkung der weltweiten Konzentrierung in der Bergbauproduktion auf die Rohstoffversorgung der deutschen Wirtschaft zu untersuchen (BMWi 1999). Hierbei wurden zehn Metallrohstoffe einbezogen, unter anderen auch Kupfer, Niob, Tantal und die seltenen Erden (engl.: *rare earth elements*, REE). Die Studie kommt bei Betrachtung verschiedener Faktoren zu folgendem Schluss: „Die Analyse von zehn ausgewählten Rohstoffmärkten hat gezeigt, dass derzeit mit anhaltenden Versorgungsproblemen auf den Weltmärkten [Lagerstättenvorräte, Produktionskapazitäten] nicht zu rechnen ist“ (BMWi 1999).

Auch nach einer Studie des Deutschen Instituts für Wirtschaftsforschung sei eine Knappheit aufgrund begrenzter Reserven und Ressourcen nicht zu befürchten (Matthes und Ziesing 2005). In dieser Studie wurden drei Gruppen von Metallen mit unterschiedlicher Reichweite in Hinblick auf die heute wirtschaftlich gewinnbaren Reserven betrachtet: Metalle mit einer statischen Reichweite von mehr als hundert Jahren (Gruppe 1) gelten demnach als sehr sicher (Eisen, Aluminium, Vanadium). Bei solchen mit einer statischen Reichweite von 40-100 Jahren (Gruppe 2) wie z.B. Chrom, Nickel, Molybdän, Selen und Wolfram ist zu erwarten, dass mit neuen Technologien und höheren Preisen ausreichend gewinnbare Reserven erschlossen werden können. Für Metalle mit einer statischen Reichweite von 10-40 Jahren (Gruppe 3) (Silber, Gold, Arsen, Bor, Cadmium, Kupfer, Indium, Mangan, Blei, Zinn, Strontium, Tantal, Thorium

und Zink) „erscheint die Notwendigkeit der Inanspruchnahme der zusätzlichen Ressourcen absehbar, die nur mit erheblichen technologischen Innovationen und bei deutlich höheren Preisniveaus möglich wird. Insgesamt ist jedoch für keinen der beschriebenen Rohstoffe eine physische Knappheit aus Sicht der Reserven- und Ressourcenverfügbarkeit absehbar“ (Matthes und Ziesing 2005).

Im Gegensatz hierzu stehen Studien über die nachhaltige Nutzung der Ressourcen. Beispielsweise intendiert die vierte Managementregel der Enquete-Kommission „Schutz des Menschen und der Umwelt“ des Deutschen Bundestages, dass man sich grundsätzlich über die Zukunft der Ressourcennutzung Gedanken machen soll. Diese Regel lautet – in Anlehnung an Daly: „Nicht-erneuerbare Ressourcen sollen nur in dem Umfang genutzt werden, in dem ein physisch und funktionell gleichwertiger Ersatz in Form erneuerbarer Ressourcen oder höherer Produktivität der erneuerbaren sowie der nicht-erneuerbaren Ressourcen *geschaffen wird*“ (Enquete-Kommission 1994). Angesichts der bei zahlreichen Metallen nicht ersichtlichen Ausweisung neuer Reserven ist fraglich, ob einige Metalle mittelfristig (wenige Jahrzehnte) ausreichend bergmännisch gewonnen werden können.

Zusammenfassend wird festgehalten, dass Seltenheit bzw. Knappheit von Stoffen kontextabhängige Größen sind, deren spezifische Bedeutung erst hinsichtlich einer ausreichend ausformulierten Fragestellung konkretisiert wird.

2.2.1 Kriterium 1: Reservenmenge

Die Verfügbarkeit der Metalle wird unter anderem durch den Umfang der Reserven beziehungsweise der Ressourcen beschrieben. Üblicherweise umfassen die Reserven und Ressourcen die zugänglichen Kontinentalzonen, da die mineralogische Prospektion sich bisher vor allem auf diese beschränkt hat und die Rohstoffvorkommen der Antarktis und der Weltmeere nur eingeschränkt einbezogen hat.

Die umfangreichsten Angaben zu Reserven und Ressourcen hat der U.S. Geological Survey veröffentlicht, doch auch andere Geologische Dienste veröffentlichen Angaben hierzu. Der weltweite Abbau von Lagerstätten und die fortwährenden Explorationsaktivitäten bewirken, dass die Größe der Metallreserven in der Regel kontinuierlichen Änderungen unterworfen ist.

Fazit

Das Kriterium „Reservemenge“ wird in der Literatur je nach Bewertungsziel unterschiedlich eingeschätzt. Aufgrund der Datenlage ist eine Beurteilung der Reserven mit Unsicherheiten bzw. Lücken behaftet. Für dieses Kriterium spricht jedoch, dass einige Metalle nur in sehr geringem Umfang weltweit vorkommen.

Aufgrund der Datenproblematik sollte dieses Kriterium nach Möglichkeit in Kombination mit weiteren Kriterien verwendet werden.

Festzustellen ist eine sehr große Spannbreite der Metallreserven: Jene von Kupfer liegen bei ca. 500 Mio. t, jene von Cadmium bei ca. 500.000 t, und jene von Ruthenium bei ca. 5.000 t. Die Metalle werden entsprechend ihrer Reservenmenge klassifiziert (Tab. 2-1).

Tab. 2-1: Klassifizierung der Metalle mithilfe des Kriteriums „Reservenmenge“.

	Reserve [t]	Metalle
äußerst geringe Reserve	< 10.000	Osmium, Thallium, Rhenium, Rhodium, Ruthenium
sehr geringe Reserve	< 100.000	Beryllium, Cäsium, Gallium, Gold, Holmium, Indium, Quecksilber, Platingruppenmetalle, Platin, Selen, Tellur, Thulium
geringe Reserve	< 1.000.000	Arsen, Bismut, Cadmium, Europium, Hafnium, Silber, Tantal, Terbium, Yttrium
große Reserve	< 10.000.000	Antimon, Cobalt, Gadolinium, Lanthan, Lithium (Salze), Molybdän, Neodym, Praseodym, Samarium, Strontium, Wolfram, Ytterbium, Zinn
sehr große Reserve	< 100.000.000	Blei, Nickel, Seltene Erden, Vanadium, Zirkonium
größte Reserve	> 100.000.000	Aluminium, Barium (Salze), Calcium, Chrom, Kupfer, Eisen, Kalium (Salze), Magnesium, Mangan, Natrium (Salze), Titan, Zink

Die Reservenmengen sind demnach am geringsten für Osmium, Rhenium, Thallium sowie die Platingruppenmetalle Rhodium und Ruthenium, so dass diese als Metalle mit „äußerst geringen Reserven“ gezählt werden. Metalle mit „sehr geringen Reserven“ sind Cäsium, Indium, Gallium, Beryllium, Tellur, Platin, Holmium, Gold, Quecksilber, die Platingruppenmetalle (als Metallgruppe) sowie Selen und Thulium. Aufgrund der Zuordnung der Platingruppenmetalle zu den Metallen mit „sehr geringen Reserven“ ist es durchaus möglich, dass auch Palladium zu den Metallen mit „sehr oder äußerst geringen Reserven“ zählt. Die weiteren Metalle sind in Tab. 2-2 aufgeführt.

2.2.2 Kriterium 2: Statische Reichweite

Die „statische Reichweite“ ist definiert als der Quotient aus Reserve und jährlicher Produktion (Gleichung 1). Sie entspricht der Dauer, wie lange die aktuellen Reserven bei konstanter Produktion auf dem jetzigen Niveau reichen (rein rechnerische Größe).

$$\text{statischeReichweite}[a] = \frac{\text{Metallreserven}[t]}{\text{Metallproduktion}[t/a]} \quad (\text{Gleichung 1})$$

Das Angebot an Rohstoffen verändert sich über die Zeit (siehe Kap. 2.2.1). Ebenso können z.B. neue Einsatzfelder der Metalle zu deutlichen Veränderungen in der Nachfrage führen. Die statische Reichweite ist damit eine zeitabhängige Größe: Durch diese doppelte zeitliche Abhängigkeit der beiden Größen, der Reservenmenge und der jährlichen Produktionsmenge, kann die statische Reichweite innerhalb weniger Jahre deutlich schwanken. Eine systematische Auswertung veröffentlichter Daten zur Reservenmenge und zur Produktionsmenge der Metalle ergibt, dass die statische Reichweite innerhalb der letzten Dekade erheblich variierte. Die folgende Tabelle verdeutlicht dies am Beispiel von Tantal (Tab. 2-2). Es ist ersichtlich, dass der U.S. Geological Survey die Reservenmenge nicht jährlich aktualisiert.

Tab. 2-2 Statische Reichweite von Tantal: Entwicklung von Produktionsmenge, Reservenmenge und statischer Reichweite im Zeitraum 1996-2008 (USGS, diverse Jahrgänge). Das Jahr gibt den Zeitpunkt der Veröffentlichung durch USGS an. Als statische Reichweite für den Gesamtzeitraum (letzte Zeile) wird der Mittelwert der statischen Reichweiten der diversen Jahre angegeben. * = eigene Annahme bzw. eigene Berechnung.

Jahr	Reservenmenge [t]	Jährliche Produktionsmenge [t]	Statische Reichweite [a]
2008	130.000	1.500*	87*
2007	43.000	1.400	31
2006	43.000	1.400	31
2005	43.000	1.260	34
2004	43.000	1.510	28
2003	39.000	1.210	32
2002	39.000	1.540	25
2001	28.000	1.300	22
2000	12.000	836	14
1999	19.000	495	38
1998	14.000	454	31
1997	15.000	413	36
1996	22.000	383	57
1996-2008	Zunahme um +491 %	Zunahme um +292 %	Ø 36

Seit 1996 ist die Reservenmenge von Tantal kontinuierlich angestiegen, insgesamt um fast 500 %. Dies kann man auf zwei Gründe zurückführen: einerseits die gestiegenen Marktpreise für Tantal, andererseits auf die Ausweitung der Explorationstätigkeit. Allerdings hat sich die statische Reichweite im Mittel des Zeitraums 1996-2008 nicht allzu sehr verändert, da die Verwendung des Metalls ebenso sehr stark angestiegen

ist. Im Jahr 2008 wurden von Brasilien neue große Reserven ausgewiesen, so dass die statische Reichweite sprunghaft auf ca. 87 Jahre angestiegen ist.

Die Definition der statischen Reichweite berücksichtigt definitionsgemäß weder Möglichkeiten verbesserten Recyclings, noch neuartige Methoden der Metallgewinnung (Urban Mining, Seewasserextraktion) oder neue Erkenntnisse aus der Materialforschung (Substitution). Zusätzlich gelten die Einschränkungen zum Kriterium 1 bezüglich der Bestimmung der Reservenmenge, da insbesondere die marinen Lagerstätten nur in geringem Umfang erforscht sind (z.B. Manganknollenfelder, schwarze Raucher). Darüber hinaus führen deutliche Preisanstiege oder neue Extraktionsverfahren (z.B. *Biomining*) dazu, dass auch Lagerstätten mit gering konzentrierten Erzen abgebaut werden können, da der Rohstoffabbau im Wesentlichen durch den Energieaufwand begrenzt wird.

Neben der statischen Reichweite wird gelegentlich auch die dynamische Reichweite der Reserven bzw. Ressourcen angegeben, welche die künftigen Veränderungen der Reservenmenge und der Produktionsmenge berücksichtigt. Diese ist jedoch nur unter weiteren, teilweise schwierig begründbaren Annahmen zu bestimmen. Aus diesem Grund wird die statische Reichweite häufiger als die dynamische verwendet, teilweise unter der Annahme realistischer Wachstumsquoten.

Fazit

Das Kriterium „statische Reichweite“ wird in der Literatur unterschiedlich bewertet. Inwiefern eine statische Reichweite groß oder gering ist, ist eine subjektive Bewertung. Zudem bildet die statische Reichweite lediglich den aktuellen Wissenstand ab, der sich durch neue technologische Entwicklungen, Abbauverfahren, neu erschlossene Lagerstätten und Substitute relativ kurzfristig verändern kann.

Das Kriterium „statische Reichweite“ könnte dennoch für ein erstes Screening genutzt werden, da es transparent anwendbar ist und Hinweise auf die mittelfristige Dringlichkeit von Exploration gibt.

Die statische Reichweite weist eine große Spannweite auf: Diejenige von Vanadium liegt bei ca. 220 Jahren, von Beryllium bei ca. 120 Jahren, von Niob bei ca. 60 Jahren und von Quecksilber bei ca. 30 Jahren. Die Metalle werden entsprechend ihrer statischen Reichweite wie folgt klassifiziert⁷ (Tab. 2-3).

⁷ Da die Spannbreite geringer ist als bei den anderen Kriterien, wird hier nicht die Klasseneinteilung nach der Zehner-Potenz gewählt, sondern eine den Daten angepasste Einteilung nach der Zweier-Potenz.

Tab. 2-3: Klassifizierung der Metalle mithilfe des Kriteriums „statische Reichweite“ (USGS 2008).

	Statische Reichweite [a]	Metalle
äußerst geringe Reichweite ⁸	< 12,5	N/A
sehr geringe Reichweite	< 25	Antimon, Arsen, Barium (Salze), Blei, Cadmium, Chrom, Gold, Indium, Silber, Strontium, Zink, Zinn
geringe Reichweite	< 50	Kupfer, Mangan, Molybdän, Nickel, Quecksilber, Thallium, Wolfram, Zirkon
große Reichweite	< 100	Bismut, Eisen, Niob, Selen, Tantal, Rhenium, Yttrium
sehr große Reichweite	< 200	Cobalt, Beryllium, Titan, Osmium, Platin, Tellur, PGM, Lithium (Salze), Gallium, Rhodium,
größte Reichweite	> 200	Aluminium, Cäsium, Europium, Gadolinium, Hafnium, Holmium, Kalium (Salze), Lanthan, Magnesium, Natrium (Salze), Neodym, Praseodym, Samarium, Seltene Erden, Ruthenium, Terbium, Thulium, Vanadium, Ytterbium

Bezogen auf das Jahr 2007 zählen zu den Metallen mit „sehr geringer Reichweite“ in absteigender Reihenfolge: Strontium (11), Silber (13), Arsen (15), Antimon (16), Gold (17), Zink (17) sowie Zinn (20), Indium (22), Blei (22), Barium (Salze)(24), Chrom (24) und Cadmium (25) (Angabe der Jahre in Klammern hinter den Metallen) (USGS 2008).

2.2.3 Kriterium 3: Jährliche Produktionsmenge

Die Metalle unterscheiden sich untereinander sehr nach ihrer Nutzungsweise und -intensität in der Technosphäre. Einige Metalle wie Eisen, Aluminium, Titan, Kupfer, Zink, Zinn und Blei heben sich von den übrigen Metallen durch ihre großen Produktionsmengen ab, daher werden sie häufig als Massenmetalle bezeichnet. Die Spannweite lässt sich wie folgt verdeutlichen: Von allen Metallen wird Eisen im größten Umfang eingesetzt. Seine Produktion betrug im Jahr 2007 weltweit ca. 940 Mio. t (USGS 2008: Iron and Steel). Von anderen Metallen wie z.B. Rhenium wurden in 2007 weltweit nur ca. 50 t produziert (USGS 2008: Rhenium). Die Produktionsmenge der seltenen Erden beträgt 123.000 t. Dies sind einerseits nur ca. 0,01 % der Produktionsmenge von Eisen, andererseits jedoch über das 600fache der Produktionsmenge von Platin (200 t).

⁸ Die unterste Grenze bei der statischen Reichweite wird zur Erhöhung der methodischen Konsistenz gegenüber früheren Versionen zu 12,5 Jahren angepasst.

Trotz der Ziele des Gesamtprojekts MaRes, Materialeffizienz und Ressourcenschonung insbesondere in Deutschland zu steigern, wird hier der Einbezug des Kriteriums „globale jährliche Produktionsmenge“ aus zwei Gründen vorgeschlagen. Zum einen werden Metalle grundsätzlich weltweit gehandelt, wodurch „Seltenheit“ bzw. „Verfügbarkeit“ primär global zu verstehen sind. Zum anderen ist ein Großteil der Umwelteinflüsse in Bezug auf Metalle außerhalb Deutschlands lokalisiert.

Fazit

Das Kriterium „jährliche Produktionsmenge“ eignet sich zum Vergleich der Intensität der Nutzung von verschiedenen Metallen. Jedoch sind keine Klassifizierungen der jährlichen Produktionsmenge in der Literatur verbreitet, so dass keine entsprechende Einstufung aus der Literatur abgeleitet werden kann. Die Metalle werden entsprechend ihrer jährlichen Produktionsmenge wie folgt klassifiziert (Tab. 2-4).

Das Kriterium „jährliche Produktionsmenge“ könnte zur Auswahl verwendet werden, da kleine Stoffströme von Metallen häufig in dominanten Stoffströmen aufgehen können, wodurch ihre Rückgewinnung in der Regel erschwert oder gar verhindert wird. Dies gilt jedoch nicht in allen Fällen und bedarf hierfür jeweils einer Einzelfallentscheidung. Als alleiniges Kriterium wird das Kriterium daher als zu unspezifisch eingeschätzt.

Tab. 2-4: Klassifizierung der Metalle mithilfe des Kriteriums „jährliche Produktionsmenge“

	Jährliche Produktionsmenge [t]	Metalle
äußerst geringe Produktion	< 100	Cäsium, Dysprosium, Europium, Gallium, Germanium, Hafnium, Holmium, Iridium, Osmium, Rhenium, Rhodium, Ruthenium, Scandium, Terbium, Thallium, Thulium, Ytterbium
sehr geringe Produktion	< 1.000	Beryllium, Erbium, Gadolinium, Indium, Palladium, Platin, Platingruppenmetalle, Tellur
geringe Produktion	< 10.000	Bismut, Gold, Lanthan, Neodym, Praseodym, Quecksilber, Samarium, Selen, Tantal, Yttrium
große Produktion	< 100.000	Arsen, Cadmium, Cer, Cobalt, Lithium, Niob, Silber, Vanadium, Wolfram
sehr große Produktion	< 1.000.000	Antimon, Molybdän, Seltene Erden, Strontium, Yttrium, Zinn, Zirkon
größte Produktion	> 1.000.000	Aluminium, Barium (Salze), Blei, Calcium (Oxid), Chrom, Eisen, Kalium (Salze), Kupfer, Magnesium, Mangan, Natrium (Salze), Nickel, Titan, Zink,

Hinsichtlich der Produktionsdaten gehören zu den Metallen mit „äußerst geringer Produktion“ Cäsium, Gallium, Germanium, Hafnium, Iridium, Osmium, Thallium,

Scandium, Ruthenium, Rhodium und Rhenium. Auch die Produktionsmengen der Lanthaniden Dysprosium, Europium, Holmium, Thulium, Terbium und Ytterbium liegen bei geschätzten 100 t pro Jahr und somit zählen auch sie zu den Metallen mit „äußerst geringer Produktion“; allerdings liegen für einige von ihnen deutlich unterschiedliche Schätzungen vor (Hafnium, Holmium, Scandium, Thulium, Terbium und Ytterbium). Zu den Metallen mit „sehr geringer Produktion“ zählen Beryllium, Erbium, Gadolinium, Indium, Platin, Palladium, die Platingruppenmetalle, Tellur und Samarium (letzteres wird zu 630 t bis 1.800 t angegeben).

2.2.4 Kriterium 4: Rohstoffpreis und Rohstoffpreisentwicklung

Der Preis von Rohstoffen spiegelt das Verhältnis von Angebot und Nachfrage wider: Ein geringes Angebot in Kombination mit hoher Nachfrage bewirkt infolge Verknappung des Rohstoffs hohe Preise. Knappe Güter sind daher im Allgemeinen durch höhere Preise gekennzeichnet – bei funktionierenden Marktmechanismen.

Ein stark steigender Preis signalisiert zudem, dass das Verhältnis Nachfrage gegenüber dem Angebot übermäßig steigt, z.B. durch eine verstärkte Nutzung in bisherigen Anwendungsfeldern oder durch die Nutzung des Metalls in neuen Anwendungsfeldern. Auch kurz- bzw. mittelfristige Knappheit könnte somit durch steigende Preise signalisiert werden.

Insgesamt sind die Rohstoffpreise von Metallen in den letzten Jahren stark angestiegen. So erhöhte sich der Gesamtpreisindex für mineralische Rohstoffe auf US\$-Basis im Zeitraum 2001/2002-2005 (Durchschnitt von 2001/2002) von 90 auf ca. 145 (Bleischwitz 2006). Langfristig betrachtet sind auf dem Rohstoffmarkt für einige Metalle fallende Preise zu verzeichnen (Reynolds 1999, Tilton 2003).

Im Allgemeinen sind die Metallpreise aus verschiedenen Gründen relativ großen kurz- bis mittelfristigen Schwankungen unterworfen. Im Folgenden soll – ohne Anspruch auf Vollständigkeit – ein Überblick über die Diversität von Einflussfaktoren dargestellt werden:

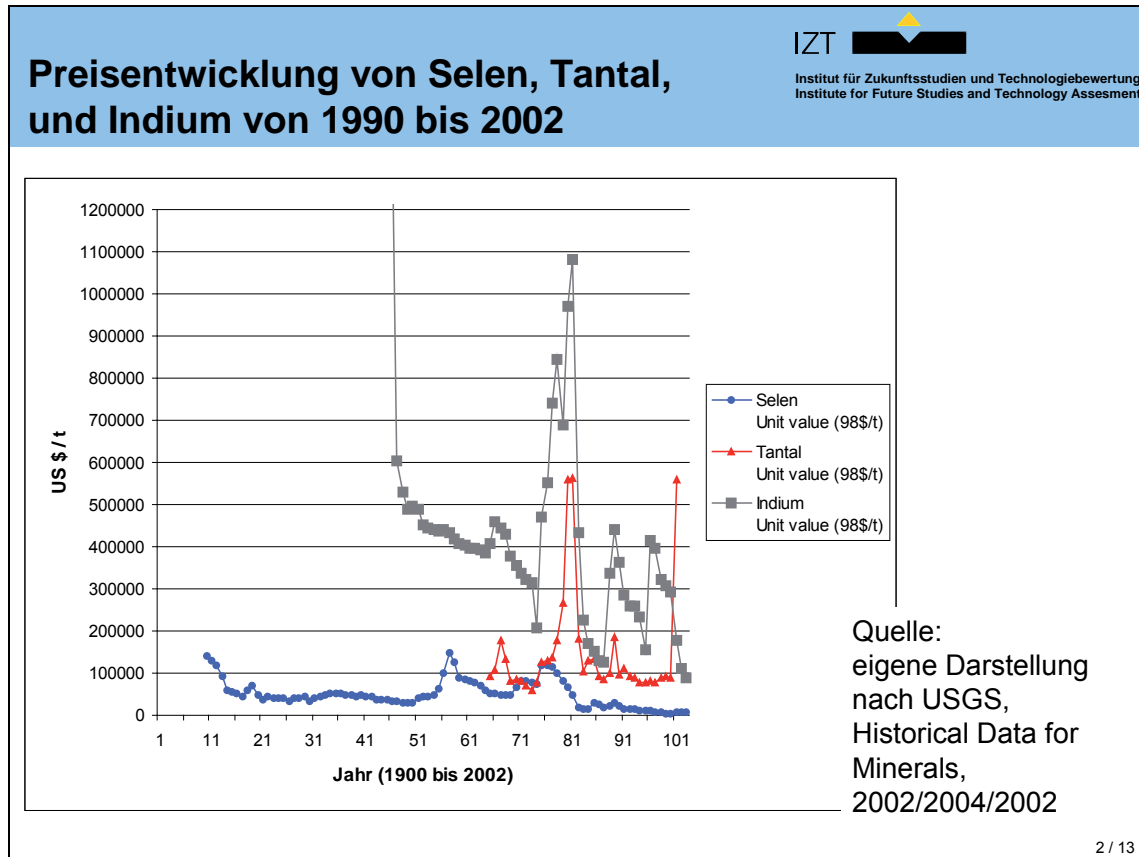
- Bergbau ist mit sehr hohen und langfristig gebundenen Investitionen verbunden, weshalb Bergbaukonzerne im Gegensatz zu Produktherstellern in längeren Zeiträumen kalkulieren und agieren. Zudem können Erkenntnisse der Materialforschung dazu führen, dass neue Anwendungsfelder von bestimmten Metallen relativ rasch in der Produktherstellung erschlossen werden. Somit können neue Märkte für die Metalle sehr rasch wachsen oder auch versiegen, beispielsweise bewirkt der Ersatz von Röhrenbildschirmen durch Flachbildschirme einen rasch ansteigenden Einsatz von Indiumzinnoxid und einen rasch sinkenden Nachfrager nach Bleioxid. Im angegebenen Beispiel wird die Nachfrage zusätzlich

erhöht durch gesellschaftliche Trends, durch die Geräte mit Flachbildschirmen zu sogenannten Massenkonsumgütern werden (z.B. internetfähige Handys, Navigationsgeräte).

- „Künftige Gewinne“, die dann zu erzielen wären, wenn die Metallpreise in Zukunft steigen würden und die Metalle erst in dieser Zukunft verkauft würden, sind ein typischer preisgestaltender Faktor im Bergbau. Ein relativ komplizierter Preisbildungsmechanismus sorgt dann am Markt dafür, dass künftig erwartete Verknappungen bereits heute auf den Preis durchschlagen (Bleischwitz 2006). In anderen Produktionsprozessen ist dieser Effekt nicht derart existent.
- Diverse Instrumente des Börsenhandels sind ein wichtiger Faktor für rasche Preisschwankungen (vgl. Schulmeister et al. 2008). So sind eine Vielzahl von Handelsinstrumenten – vereinfacht ausgedrückt – Wetten auf Preisentwicklungen (Spekulationen). Diese spiegeln nur bedingt die realen Marktverhältnisse von Preisen in unmittelbaren Käufer-Verkäufer-Beziehungen wider und können auch durch gezielte An- und Verkäufe von Aktieninstrumenten mehr oder weniger gesteuert werden (vgl. FAZ 2004).
- Teile des Metallmarktes werden durch fixe Preise über einen bestimmten Zeitraum zwischen den Minenproduzenten und den Metallherstellern vereinbart, so dass die Preisbildung am Spotmarkt nicht unbedingt mit Handelspreisen zu vergleichen ist.

Die Folge dieses komplexen Gemenges an Rahmenbedingungen und Einflussfaktoren sind relativ schwer erklärbare und kaum vorhersagbare Preisverläufe. In der folgenden Abbildung sind exemplarisch die Preisverläufe für einige, aktuell für die EuE-Industrie wichtige Metalle aufgeführt (Selen, Tantal, Indium, Niob und Kupfer). Die Preise sind in konstanten US\$ mit Basisjahr 1998 ausgewiesen. Für Selen und Kupfer reichen die Daten bis 1900 zurück, für Indium bis 1930, für Tantal und Niob bis 1964.

Abb. 2-2: Preisentwicklung von Selen, Tantal und Indium im Verlauf des 20. Jahrhunderts. Angaben in konstanten US\$ pro Tonne (1998 = 100). Quelle: Eigene graphische Darstellung nach USGS Historical Statistics: Selenium/2004, Tantalum/2002, Indium/2004. Anmerkung: Die Preise sind auf den US-amerikanischen Markt bezogen.

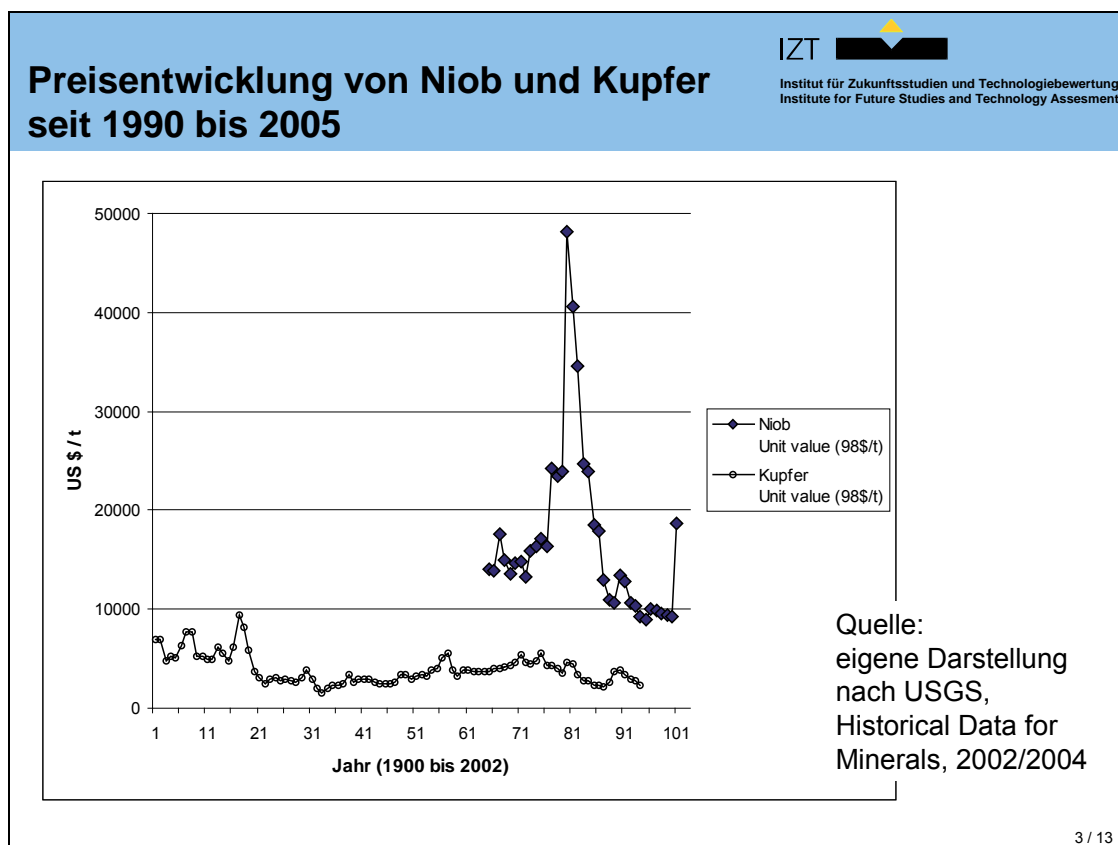


Bei Betrachtung der Abbildungen 2-2 und 2-3 wird deutlich, dass über nahezu ein Jahrhundert der Preis für Kupfer relativ stabil war. Der Preis für Selen weist einige extreme Peaks auf, ist jedoch insgesamt gefallen. Niob hingegen hatte eine sehr hohe Preisspitze um ca. 1980 und fiel dann erneut auf sein mittelfristige Preisniveau; im Jahr 2000 stieg sein Preis analog zu jenem von Tantal erneut auf ein höheres Niveau, da auch Niob für die Kondensatorenherstellung genutzt wird. Auf Basis der Daten des U. S. Geological Surveys zeigt der Verlauf der Rohstoffpreise von Tantal und Indium sehr große Schwankungen. Ursache für den Peak von Tantal in 2000 war eine sehr hohe Nachfrage nach Tantalkondensatoren bei gleichzeitigen Lieferschwierigkeiten der Hersteller (Bleischwitz 2006).

Eine Schwäche des Kriteriums „Rohstoffpreis“ lässt sich an der Preisentwicklung von Indium verdeutlichen, welches für mehrere unterschiedliche Zwecke genutzt wird. Indium wird als Koppelprodukt aus Schlacken von Zink-, Zinn-, Blei- und Kupfererzen

gewonnen (vgl. Teil II, Kap. III) und es gibt somit keine Minen mit Indium als Hauptprodukt. Das Angebot richtet sich demnach nicht in erster Linie nach der Nachfrage, sondern den Produktionsmengen der Hauptprodukte Zink, Zinn, Blei und Kupfer, bei deren Produktion es als Nebenprodukt anfällt. Dies lässt bei derartigen Kuppelprodukten des Bergbaus signifikante Ausschläge erklären.

Abb. 2-3: Preisentwicklung von Niob und Kupfer im Verlauf des 20. Jahrhunderts. Angaben in konstanten US\$ pro Tonne (1998 = 100). Quelle: Eigene graphische Darstellung nach USGS Historical Statistics: Columbinum/2002, Copper/2004. Anmerkung: Die Preise sind auf den US-amerikanischen Markt bezogen.



Ein weiteres Argument in der wirtschaftlichen Diskussion sind die aktuell gestiegenen Rohstoffpreise, die von Unternehmen und Verbänden beklagt werden. In der Diskussion werden Steigerungen von Rohstoffpreisen im höheren zweistelligen Prozentbereich genannt. Dabei ist unklar, inwiefern die Rohstoffkosten von den Lohn- und Finanzkosten tatsächlich getrennt betrachtet werden. Beispielsweise enthält ein Handy ca. 10 g Kupfer (Hagelüken 2007), was einem Wert von nur ca. 7,2 US-Cent entspricht. Selbst wenn ein Handy ca. 0,1 g Gold enthält, so entspräche dies nur einem Wert von 2,2 US\$. Weiterhin ist der Metallwert (Wertstoffgehalt) für die weitaus meisten Produkte nur gering im Verhältnis zu den Produktionskosten, die vor allem

durch die Lohnkosten geprägt sind. Es ist diesbezüglich zu prüfen, ob in dieser Diskussion tatsächlich nur die Materialkosten berücksichtigt werden oder die Zulieferungen der langen Vorketten schlicht unter „Materialkosten“ zusammengefasst werden. Angesichts der Diskussion der letzten Jahrzehnte über die Lohnnebenkosten erscheint es nicht plausibel, dass die Rohstoffkosten nunmehr so deutlich ins Gewicht fallen. Tab. 2-5 zeigt, dass die Rohstoffkosten im Zeitraum 2004-2007 für eine Vielzahl betrachteter Metalle zwischen 10 % und 100 % gestiegen sind (im Falle von Arsen noch mehr), allerdings ist es möglich, dass dies auf die steigenden Energiepreise zurückzuführen ist, da die Metallurgie mit hohen Energieaufwendungen verbunden ist.

Trotz der zuvor beschriebenen allgemeinen Trends ist die Preisentwicklung eine metallspezifische Größe – gerade aufgrund der oben genannten verschiedenen Einflussfaktoren. Dies lässt sich anhand der vom USGS für zahlreiche Metalle aufgeführten Jahresdurchschnittspreise bzw. Jahresendpreise aufzeigen (Tab. 2-5).

Tab. 2-5: Entwicklung von Metallpreisen für den Zeitraum 2004-2007; Preise 2007 sind geschätzt. Zur besseren Vergleichbarkeit der Preise wurden die originalen Preisangaben mit Mengenbezugsgrösse (angegeben auf Englisch) umgerechnet in Preise pro Kilogramm. Quelle: USGS (2008).

Metalle	Preis [US\$ pro Referenzeinheit]		Referenzeinheit	Preis [US\$/kg]		Veränderung im Zeitraum 2004-2007	Anmerkung
	2004	2007		2004	2007		
Aluminium	84,00	125,00	US cent per pound	1,85	2,76	+49 %	
Aluminium	22,00	27,00	US\$ per tonne	0,02	0,03	+23 %	bezogen auf Aluminiumoxid
Antimon	130,00	259,00	US cent per pound	2,87	5,71	+99 %	
Arsen	88,00	130,00	US cent per pound	1,94	2,87	+48 %	bezogen auf metallisches Arsen
Arsen	49,00	25,00	US cent per pound	1,08	0,55	-49 %	bezogen auf Arsenoxid; China
Barium	35,10	40,00	US\$ per tonne	0,04	0,04	+14 %	bezogen auf Bariumsulfat; Preis ab Mine
Beryllium	125,00	141,00	US cent per pound	2,76	3,11	+13 %	bezogen auf Be-Cu-Legierung (4% Berylliumgehalt)
Bismut	3,30	13,70	US\$ per pound	7,28	30,20	+315 %	
Blei	40,20	109,00	US cent per pound	0,89	2,40	+171 %	LME-Preis
Cadmium	1,20	8,20	US\$ per kilogram	1,20	8,20	+583 %	LME Preis
Calcium	64,80	84,00	US\$ per tonne	0,06	0,08	+30 %	Calciumoxid, Branntkalkhydrat
Cäsium	N/A	558,00	US\$ per 50 grams	N/A	11.160	N/A	bezogen auf reines Cäsium (99,8 %); Preis pro Kilogramm gerundet auf ganze US\$
Chrom	1.322	1.555	US\$ per tonne	1,32	1,56	+18 %	bezogen auf Ferrochrom; Preis pro Tonne gerundet auf ganze US\$
Chrom	5.823	7.859	US\$ per tonne	5,82	7,86	+35 %	bezogen auf metallisches Chrom; Preis pro Tonne gerundet auf ganze US\$
Cobalt	23,90	30,20	US\$ per pound	52,69	66,58	+26 %	bezogen auf Kathoden-Cobalt
Gallium	550,00	460,00	US\$ per kilogram	550,00	460,00	-16 %	bezogen auf hochreines Gallium
Germanium	600	1.240	US\$ per kilogram	600	1.240	+107 %	bezogen auf raffiniertes Germanium; Preis pro Kilogramm gerundet auf ganze US\$
Gold	411,00	675,00	US\$ per troy ounce	13.214	21.702	+64 %	Preis pro Kilogramm gerundet auf Euro

Metalle	Preis [US\$ pro Referenzeinheit]		Referenzeinheit	Preis [US\$/kg]		Veränderung im Zeitraum 2004-2007	Anmerkung
	2004	2007		2004	2007		
Hafnium	223,00	232,00	US\$ per kilogram	223,00	232,00	+4 %	
Indium	643,00	795,00	US\$ per kilogram	643,00	795,00	+24 %	bezogen auf hochreines Indium
Iridium	185,00	440,00	US\$, per troy once	5.948	14.147	+138 %	Preis pro Kilogramm gerundet auf ganze US\$
Kalium	200,00	390,00	US\$ per ton	0,20	0,39	+95 %	bezogen auf Kaliumoxid; Preisangabe: f.o.b. ab Mine
Kupfer	130,00	329,00	US cent per pound	2,87	7,25	+153 %	LME Preis, bezogen auf hochreines Kupfer
Mangan*	2,90	3,30	US\$ per ton ore	0,01	0,01	+14 %	umgerechnet auf das Metall Mangan (Faktor 0,47)
Molybdän	36,70	64,70	US\$ per kilogram	36,70	64,70	+76 %	
Natrium	117,00	177,00	US\$ per short ton	128,97	195,11	+51 %	bezogen auf Natriumcarbonat; Preisangabe: f.o.b. (Mittelwert div. f.o.b.)
Natrium	114,00	134,00	US\$ per short ton	125,66	147,71	+18 %	bezogen auf Natriumsulfat
Nickel	13,80	37,70	US\$ per ton	0,01	0,04	+173 %	LME Preis
Niob	6,57	N/A	US\$ per pound	14,48	N/A	-23 %	Preis für Ferroniob
Palladium	233,00	360,00	US\$ per troy once	7491	11.574	+55 %	Preis pro Kilogramm gerundet auf ganze US\$
Platin	849,00	1.260,00	US\$ per troy once	27.296	40.511	+48 %	Preis pro Kilogramm gerundet auf ganze US\$
Osmium	N/A	380,00	US\$ per troy once	N/A	12.217	N/A	Preis pro Kilogramm gerundet auf ganze US\$; Bezugsjahr: 2008; Quelle: www.taxfree.gold
Quecksilber	400,00	550,00	US\$ per flask	11,60	15,95	+38 %	
REE	4,10	4,10	US\$ per kilogram	4,10	4,10	0 %	bezogen auf Bastnäsit-Konzentrat
Rhenium	1.090	1.330	US\$ per kilogram	1090,00	1330,00	+22 %	bezogen auf Metallpulver; Preis pro Troy-Unze gerundet auf ganze US\$
Rhodium	983	6.060	US\$ per troy once	31.605	194.837	+516 %	Preis pro Troy-Unze/Kilogramm gerundet auf ganze US\$
Rubidium	N/A	1.118	US\$ per 100 grams	N/A	11.180		Preis pro 100 g/Kilogramm gerundet auf ganze US\$; Bem.: Metall wird nicht gehandelt
Ruthenium	64,00	610,00	US\$ per troy once	2058	19.612	+853 %	Preis pro Kilogramm gerundet auf ganze US\$

Metalle	Preis [US\$ pro Referenzeinheit]		Referenzeinheit	Preis [US\$/kg]		Veränderung im Zeitraum 2004-2007	Anmerkung
	2004	2007		2004	2007		
Scandium	124,00	131,00	US\$ per gram	124.000	131.000	+6 %	bezogen auf reines Metall; Preis pro Kilogramm gerundet auf ganze US\$
Selen	24,90	33,00	US\$ per pound	54,89	72,75	+33 %	bezogen auf raffiniertes Selen; Preis 100 p lot
Silber	6,70	13,40	US\$ per troy ounce	215,41	430,83	+100 %	
Strontium	53,00	68,00	US\$ per ton	0,05	0,07	+28 %	Preisangabe: f.o.b. Port of Exportation
Tantal	30,00	36,00	US\$ per pound Ta ₂ O ₃	75,16	90,19	+20 %	umgerechnet auf das Metall Tantal (Faktor 0,88)
Tellur	13,00	80,00	US\$ per kilogram	13,00	80,00	+515 %	
Thallium	1.600	4.560	US\$ per kilogram	1600	4.560	+185 %	Preis gerundet auf Euro
Titan	8,50	16,00	US\$ per kilogram	8,50	16,00	+88 %	bezogen auf Titanschwamm
Titandioxid	455,00	488,00	US\$ per ton	0,46	0,49	+7 %	bezogen auf Titandioxid (95 %); Preisangabe: f.o.b. Australien
Vanadium	6,00	7,40	US\$ per pound V ₂ O ₅	23,62	29,13	+23 %	umgerechnet auf das Metall Vanadium (Faktor 0,56)
Wolfram	49,00	190,00	US\$ per mtu WO ₃	6,18	23,96	+288 %	mtu: metric ton unit (7,93 kg Wolfram)
Yttrium	96,00	111,00	US\$ per kilogram	96,00	111,00	+16 %	Bezugsjahr 2007 (Jahresmittelwert)
Zink	47,50	151,00	US cent per pound	1,05	3,33	+218 %	LME-Preis
Zinn	222,00	628,00	US cent per pound	4,89	13,84	+183 %	LME-Preis
Zirkon	31,00	25,00	US\$ per kilogram	31,00	25,00	-19 %	bezogen auf Rohmetall
Zirkon	557,00	840,00	US\$ per ton	0,56	0,84	+51 %	bezogen auf Zirkonoxid

Fazit

Gemäß Tab. 2-5 sind die teuersten Metalle Rhodium und Scandium mit Preisen pro Kilogramm von ca. 195.000 US\$ beziehungsweise 131.000 US\$. Im Verhältnis dazu sind Platin mit ca. 40.000 US\$, Gold mit ca. 22.000 US\$, Ruthenium mit ca. 20.000 US\$ und Iridium mit ca. 14.000 US\$ deutlich günstiger. Die Preise pro Kilogramm von Cäsium, Rubidium, Palladium und Osmium liegen zwischen 11.200 US\$

und 12.200 US\$. Auch Germanium, Rhenium und Thallium zählen mit mehr als 1.000 US\$ pro Kilogramm zu den teuren Metallen (alle Angaben bezogen auf 2007).

Betrachtet man die Preissteigerungen im Zeitraum 2004-2007, so sind die Preise für Arsen, Niob, Zirkon und Gallium entgegen dem allgemeinen Trend gefallen. Zahlreiche Metallpreise sind nur moderat gestiegen (zwischen 0 % und 20 %). Preissteigerungen von mehr als 100 % weisen Silber, Germanium, Iridium, Kupfer, Blei, Nickel, Zinn und Thallium auf, Zink und Wolfram Preissteigerungen von mehr als 200 %, Bismut sogar Preissteigerungen von mehr als 300 %. Die höchsten Preissteigerungen weisen Tellur, Rhodium und Cadmium (mehr als 500 %) sowie Ruthenium (850 %) auf.

Es ist festzuhalten, dass weder hohe absolute Preise, noch starke jährliche Preissteigerungen hinreichende Kriterien zur Bestimmung der „Seltenheit“ von Metallen sind. Über längere Zeiträume betrachtet können die Metallpreise stark schwanken. Derartige Schwankungen der Rohstoffpreise reflektieren jedoch die kurzfristige Marktverfügbarkeit bzw. deren Einschätzung, wie dies beispielsweise in der aktuellen Rohstoffbaisse deutlich wird. Daher wird vorgeschlagen, dass der Metallpreis nicht oder lediglich ergänzend in Kombination mit anderen Kriterien zur Auswahl beitragen soll.

2.2.5 Kriterien 5 und 6: Geographische Konzentration der globalen Reserven und der globalen Primärproduktion

Seit einiger Zeit wird in Politik und Wissenschaft die Ressourcenpolitik nicht mehr ausschließlich aus der Umweltperspektive, sondern zunehmend auch der volkswirtschaftlichen Perspektive diskutiert. Bereits 1999 ließ das Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie (BMWi) eine Studie zu den Auswirkungen der weltweiten Konzentrierung der Bergbauproduktion auf die Rohstoffversorgung in der deutschen Wirtschaft verfassen (BMWi 1999). In dem Bericht wird das Risiko des Versorgungsausfalls für zehn Metalle, die als Legierungselement in der Stahlindustrie genutzt werden, unter Zuhilfenahme von politisch-wirtschaftlichen und wettbewerblichen Kriterien differenziert bewertet. Von Bedeutung hierbei ist – angesichts der zumeist marktwirtschaftlich orientierten Bergbaukonzerne – dass auch die jeweilige politische Situation im Abbau Land in die Bewertung eingeflossen ist. Als Kriterien zur Bewertung des Ausfallrisikos wurden hierzu folgende Risiken aufgenommen (Tab. 2-6).

Obwohl die Studie darlegt, dass keine anhaltenden Versorgungsprobleme auf den Weltmärkten zu erwarten sind, existieren Risiken eines kurz- und mittelfristigen Versorgungsausfalls. Die größten derartigen Risiken sind für Niob, Wolfram, Vanadium und den Seltenen Erden gesehen worden (BMWi 1999). Die Gründe für die hohen Risiken von Wolfram und den seltenen Erden liegen vor allem auf der Angebotsseite, da diese Metalle überwiegend in China gewonnen werden und zudem China auch die größten ausgewiesenen Reserven besitzt. Nahezu die gesamten Reserven von

Vanadium liegen in China, Russland und Südafrika, die auch die alleinigen Produzenten des Metalls sind. Niob hingegen wurde zum Zeitpunkt der Studie zu gut drei Vierteln von einem einzigen brasilianischen Unternehmen gewonnen, während sich der größte Teil der bekannten Reserven in Brasilien befindet. Zudem wird die politisch-wirtschaftliche Situation Brasiliens in der Studie als problematisch eingeschätzt, weshalb Niob zu den risikobehafteten Elementen gezählt wurde (BMW 1999).

Tab. 2-6: Kriterien zur Bewertung von Risiken eines Versorgungsausfalls (BMW 1999)

Politisch-wirtschaftliches Risiko	Wettbewerbliches Risiko
Konzentration der Vorräte	Marktstruktur
Konzentration der Exporte	Wettbewerb/Angebotsseite (Intensität, Zutritts-schranken, Angebotsflexibilität, Preisbildung)
Konzentration der Produktion	Nachfrageseite (Nachfragemacht, Möglichkeit der Substitution, Preiselastizität)
Anteil der Sekundärmetallproduktion (Korrekturfaktor)	

In einer im Auftrag des Bundesministeriums für Wirtschaft und Arbeit erstellten Studie wurden die rohstoffwirtschaftliche Situation und rohstoffpolitische Handlungsoptionen untersucht (BMWA 2005). Hier standen die Liefer- und Wertschöpfungsketten im Mittelpunkt der Betrachtung. Untersucht wurden Eisen und Stahlveredler, NE-Metalle, Edelmetalle, Sondermetalle und einige Nichtmetalle⁹. Für jeden Stoff wurden sogenannte rohstoffwirtschaftliche Steckbriefe mit den Rubriken Verwendung, Angebot, Nachfrage, Preisentwicklung, Recyclingrate und Substitutionsmöglichkeit erstellt¹⁰, sowie partiell die Sensibilität der Liefer- und Wertschöpfungskette hinsichtlich eines Versorgungsausfalls, die strategische Bedeutung der Metalle und zusätzliche Sonderprobleme betrachtet (BGR 2005). Diese Studie kommt zu dem Schluss, dass zahlreiche Sensibilitäten in der Liefer- und Wertschöpfungskette vorhanden sind und somit Einfluss auf die deutsche Industrie erhalten können. Die in der Studie herausgearbeiteten Sensibilitäten beziehen sich vor allem auf die Herkunft der metallischen Rohstoffe sowie die Lokalisierung der Verarbeitung bzw. Produktion der

⁹ Die untersuchten Metalle umfassen Silber, Aluminium, Gold, Cadmium, Cobalt, Chrom, Kupfer, Eisen, Lithium, Magnesium, Mangan, Molybdän, Niob, Nickel, Blei, Palladium, Platin, Rhodium, Zinn, Tantal, Titan, Wolfram, Zink und Zirkon.

¹⁰ Allerdings liegen diese Daten nicht für jeden der Stoffe vor, vgl. BGR (2005).

Metalle. Potenzielle Risiken liegen in Ländern, die teilweise politisch instabil sind oder die nicht uneingeschränkt einen freien Metallhandel zulassen¹¹.

Ein weiterer wichtiger Einflussfaktor ist der Nachfragesog der BRIC-Staaten¹², das sind Brasilien, Russland, Indien und China in Bezug auf Eisen und die Stahlveredler, die Platingruppenmetalle, sowie Magnesium und Zirkon. Bei den Platingruppenmetallen, Magnesium, Niob, Tantal und Wolfram treten Konzentrationen der Produktionskapazitäten hinzu. Insgesamt gibt es jedoch nach Auffassung der Herausgeber dieser Studie hinsichtlich der geographischen und/oder unternehmerischen Konzentration für die betrachteten Metalle keinen Anlass zu Befürchtungen hinsichtlich eines Versorgungsausfalls (BMW 2005).

Mit der langfristigen Versorgungssicherheit Deutschlands in Bezug auf mineralische Rohstoffe und Industriemineralien befasste sich der Bericht des BMWi „Trends der Angebots- und Nachfragesituation bei mineralischen Rohstoffen“ (BMW 2005). Zu diesem Zweck werden Angebots- und Nachfragetrends für ausgewählte Metalle beschrieben und die Rohstoffnachfrage Deutschlands und seine Abhängigkeit von Rohstoffimporten diskutiert. Daraus werden Politikempfehlungen abgeleitet, um die langfristige Versorgungssicherheit sicherstellen zu können. Kritisch in Bezug auf die Versorgungssicherheit werden jene Rohstoffe eingestuft, deren Förderung sich auf einige wenige Länder der Welt konzentriert und die darüber hinaus als politisch und wirtschaftlich instabil gelten.

In dieser Untersuchung zur Auswahl von möglichen seltenen Metallen werden länderbezogene Daten zur Produktion¹³ und zu den Reserven erfasst (vgl. Anhang 1). Ziel dieser Analyse ist die Bestimmung der Metalle, deren Produktion oder deren Vorkommen auf wenige Herkunftsländer konzentriert sind. Hierzu wurden die Daten zur Produktion und zu den Reserven vom U.S. Geological Survey übernommen (USGS 2008, vgl. Anhang 1). Die Daten zur Produktion beziehen sich auf die vorläufigen Werte für 2007; die Daten zu den Reserven sind fortentwickelte Daten, jedoch nicht auf ein bestimmtes Stichjahr bezogen. Die länderbezogenen Daten wurden anschließend auf die Summe der Daten aller Herkunftsländer bezogen und damit der jeweilige Anteil an der globalen Produktion bzw. den Reserven ermittelt.

Für insgesamt 42 Metalle bzw. metallische Rohstoffe und für die Seltenerdmetalle konnte eine Datenanalyse durchgeführt werden. Bei manchen Metallen wie

¹¹ In jenen Ländern kommt eine starke politische Einflussnahme auf den Metallhandel aufgrund volkswirtschaftlicher Erwägungen vor.

¹² Die BRIC-Staatengruppe besteht aus Brasilien, Russland, Indien und China.

¹³ Hierbei ist zu bedenken, dass nicht alle Metalle auch in allen Ländern, in denen sie abgebaut werden, hergestellt werden können.

beispielsweise Barium, Calcium, Natrium, Kalium und Magnesium lagen Daten nur zu ausgewählten Mineralien vor. Darüber hinaus lagen neben den Daten zur Produktion von Aluminium, Eisen und Stahl sowie Titan auch die Daten zu deren Oxiden vor. Für einige Metalle, die nur in geringem Umfang genutzt bzw. nicht frei gehandelt werden, ist die Datenlage nicht zufriedenstellend (Cäsium, Gallium). Seit einiger Zeit greift zudem eine Veröffentlichungssperre für amerikanische Firmen in Bezug auf bestimmte Produktionsdaten, weshalb die US-amerikanische Produktion teilweise in der globalen Produktion bzw. Reserve fehlen.

Die Metalle werden entsprechend ihrer geographischen Konzentration wie folgt klassifiziert, um Besonderheiten der Konzentration von Produktion und Reserven offenzulegen (Tab. 2-7).

Tab. 2-7: Klassifizierung der Metalle mithilfe der Kriterien „geographische Konzentration der Produktion“ bzw. „geographische Konzentration der Reserven“

	Konzentration der Produktion	Konzentration der Reserven
äußerst hohe Konzentration	> 75 % in 1 Land	> 75 % in 1 Land
sehr hohe Konzentration	> 90 % in 2-3 Ländern	> 90 % in 2-3 Ländern
hohe Konzentration	> 50 % in 1 Land	> 50 % in 1 Land
erhöhte Konzentration	> 50 % in 2 Ländern	> 50 % in 2 Ländern
schwach erhöhte Konzentration	> 50 % in 3 Ländern	> 50 % in 3 Ländern
keine Besonderheiten	Verteilung der Produktion auf viele Länder	Verteilung der Reserven auf viele Länder
mangelhafte Datenlage	fehlende Daten der Produktionsverteilung	fehlende Daten der Reservenverteilung

Ergebnisse

Die vorliegenden Daten wurden hinsichtlich der geographischen Konzentration der Produktion und derjenigen der Reserven analysiert und entsprechend den in Tab. 2-7 genannten Klassen klassiert (Tab. 2-8).

Tab. 2-8: Geographische Konzentration der Produktion und der Reserven (ohne Berücksichtigung von Sekundärressourcen). Für Arsen, Barium, Calcium, Kalium, Lithium, Magnesium, Natrium wurden die relevanten Salze betrachtet und nicht die Metalle, die überwiegend in sehr geringen Mengen produziert werden (vgl. Anhang 1).

Kriterium	Produktion	Reserven
äußerst hohe Konzentration	Be, Nb, Pt, Sb, REE, W, Y	Bi, Nb, PGM
sehr hohe Konzentration	Bi, Hg, Pd, Te, V, Zr	Cr, Li (Salze), Ta, V
hohe Konzentration	As (Oxid), Bi, Ba (Sulfat), Ca (Oxid), Hg, Ta, Te	Cr, In, K (Oxid), Li (Salz), Ta, W
erhöhte Konzentration	Al (Erz), Cr, Fe (Erz und Metall), In, K (Oxid), Li (Salz), Mg, Mo, Pb, Re, Se, Sr, Ti (Erz und Metall), Sn	Al, Co, Ba (Salz), Hf, Mg, Mn, Mo, Sb, REE, Ti, Zr
schwach erhöhte Konzentration	Al (Metall), Co, Mn, Zn	Ni, Pb, Sn, Y, Zn
keine Besonderheiten	Cd, Au, Cu, Na (Salze), Ni, Ag, Ti	Au, Ag, Ca (Carbonat), Cd, Fe, Cu, Na (Salze), Se, Ti, Tl, Te
mangelhafte Datenlage	Ca (Metall), Cs, Ce, Dy, Er, Eu, Ga, Ge, Gd, Hf, Ho, Ir, K (Metall), La, Li (Metall), Lu, Na (Metall), Nd, Os, Pr, Pm, Rh, Rb, Ru, Sm, Sc, Tb, Tm, Yb	As, Be, Cs, Ce, Dy, Er, Eu, Ga, Ge, Gd, Hg, Ho, Ir, La, Lu, Nd, Os, Pd, Pt, Pr, Pm, Rb, Re, Rh, Ru, Sa, Sc, Sr, Tb, Tm, Yb

Hinsichtlich der geographischen Konzentrationen zeigt sich folgende Situation:

- Die globale Produktion der Metalle Antimon, Beryllium, Niob, Platin, seltene Erden, Yttrium und Wolfram ist jeweils zu über 75 % auf ein einzelnes Land konzentriert („äußerst hohe Konzentration“). Sie ist für die Metalle Palladium, Quecksilber, Tantal, Tellur, Vanadium, Bismut und Zirkon jeweils zu über 90 % auf bis zu drei Länder konzentriert („sehr hohe Konzentration“). Bei Arsentrioxid, Bariumsulfat, Calciumoxid¹⁴, Quecksilber, Tantal, Tellur und Bismut ist die globale Produktion zu über 50 % auf ein Land konzentriert („hohe Konzentration“).
- Die globalen Reserven von Niob, Bismut und den PGM sind zu über 75 % auf ein einzelnes Land konzentriert („äußerst hohe Konzentration“). Sie sind für Lithium (Salze), Rhenium, Tantal und Vanadium jeweils zu über 90% auf bis zu drei Länder konzentriert („sehr hohe Konzentration“). Bei Chrom, Indium, Kalium (Oxide),

¹⁴ Das Beispiel Calciumoxid verdeutlicht, dass das Kriterium „geographische Konzentration“ immer nur metallspezifisch zu gewichten ist: Calciumoxid ist die Grundlage für Zement, der aufgrund der großen inländischen Bautätigkeit überwiegend in China hergestellt wird. Calciumoxid wird aus Carbonaten gewonnen, die nach Siliziumdioxid der wichtigste Bestandteil der Erdkruste sind und die global gleich verteilt sind.

Lithium (Salze), Rhenium, Tantal und Wolfram sind die globalen Reserven zu über 50 % auf ein Land konzentriert („hohe Konzentration“).

Die Analyse der Daten zeigt, dass einige der obengenannten Konzentrationen sich in wenigen, sehr rohstoffreichen Ländern häufen:

- Eine auffällig hohe geographische Konzentration weist China auf – sowohl hinsichtlich der globalen Produktion, als auch der Reserven: Es besitzt bei acht Metallen bzw. Salzen einen Produktionsanteil von über 50 % (Antimon, Arsen, Barium (Salze), Calcium, Quecksilber, seltene Erden, Bismut, Wolfram), während es bei drei Metallen einen Anteil der globalen Reserven über 50 % besitzt (Indium, Bismut, Wolfram).
- Obwohl Kanada nur über 3 % der Tellurreserven verfügt, ist die Produktion zu über 56 % dort konzentriert. Dies ist durch die Produktion von Tellur aus den Schlämmen der Kupfer- und Nickelproduktion begründet.
- Brasilien verfügt über 68 % der Tantalreserven, produziert jedoch nur 18% der globalen Produktion, hingegen produziert Australien 61 %, obwohl sein Anteil an den globalen Reserven lediglich 31 % beträgt.
- Obwohl Guinea mit 30 % den höchsten Anteil an den globalen Bauxitreserven besitzt, produziert es nur 7 % des Aluminiums.

Die auffälligsten geographischen Konzentrationen der von Reserven und Produktion der Metalle sind in Tabelle Tab. 2-9 zusammengefasst.

Tab. 2-9: Geographische Konzentrationen der Reserven und der Produktion von Metallen

Metall	Produktion	Reserven
Antimon	China 81 %	
Arsen (Arsentrioxid)	China 51 %	
Barium (Bariumsulfat)	China 55 %	
Beryllium	USA 77 %, China 15 %	
Calcium (Calciumoxid)	China 61 %	
Chrom		Südafrika 61 % (eigene Berechnung)
Indium	China 49 %	China 73 %
Kalium (Kaliumoxid)		Kanada 53 %
Lithium		Chile 73 %
Niob	Brasilien 89 %	Brasilien 96 %
Palladium	Russland 41 %, Südafrika 40 %	unbekannt
Platin	Südafrika 80 %, Russland 12 %	unbekannt
PGM		Südafrika 89 %
Quecksilber	China 73 %, Kirgisien 17 %	wenige Daten verfügbar
Rhenium	Chile 46 %	Chile 52 %
Seltene Erden (REE)	China 97 %	
Tantal	Australien 61 %, Brasilien 18 %	Brasilien 68 %, Australien 31 %
Tellur	Kanada 56 %, Peru 26 %, Japan 19 %	
Vanadium	Südafrika 37 %, China 32 %, Russland 27 %	Russland 38 %, China 38 %, Südafrika 23 %
Bismut	China 53 %, Mexiko 21 %, Peru 17 %	China 75 %
Wolfram	China 86 %	China 62 %
Yttrium	China 99 %	
Zirkon	Australien 44 %, Südafrika 33 %, China 14 %	Südafrika 37 %, Australien 24 %

Quelle: nach USGS (2008)

Aus wirtschaftspolitischer Sicht wird das Kriterium der geographischen Konzentration der Reserven als relevant eingeschätzt, da es unter Umständen die Versorgungssicherheit direkt beeinflussen kann; aus umweltpolitischer Sicht wird dieses Kriterium hingegen als wenig relevant eingeschätzt, da die Umwelteinflüsse der Gewinnung bzw. Herstellung der Metalle nur dann eine Rolle spielen, wenn länderspezifischen Gegebenheiten sich direkt auf die Umweltbelastungen auswirkt, beispielsweise bei der Gewinnung von Metallen in sensiblen Ökosystemen. Diese Bedingungen sollten jedoch direkt bei den Umweltbelastungen der Metalle erfasst werden.

Das Kriterium der geographischen Konzentration der Reserven wird als nicht geeignet zur Bestimmung der „Seltenheit“ von Metallen erachtet.

Aus Sicht der geographischen Konzentration der Produktion bzw. Reserven sind Antimon, Beryllium, Bismut, Niob, Platin, REE, Yttrium und Wolfram von besonderem Interesse für eine vertiefende Untersuchung, da bei diesen entweder die Produktion oder die Reserven geographisch auffällig konzentriert sind (Vorkommen oder Produktion in einem Land mit mehr als 75 % Anteil). Ferner wären Palladium, Quecksilber, Rhenium, Tantal, Tellur, Vanadium und Zirkon zu beachten (Vorkommen oder Produktion in zwei bis drei Ländern mit mehr als 90 %).

2.2.6 Kriterium 7: Feinverteilung von Metallen

Metalle werden in unterschiedlicher Form eingesetzt, so in reiner (metallischer) Form, als Legierung, als Oxid oder als andere Verbindung. Im Kreislauf der Güterproduktion sind Metalle sowohl als Produktionshilfsmittel, als konstruktive Elemente für metallverarbeitende Maschinen als auch in den Endprodukten anzutreffen. Prinzipiell sind alle Metalle beliebig oft rezyklierbar ohne Verlust ihrer Eigenschaften – im Unterschied zu Kunststoffen oder anderen organischen Verbindungen. Die Nutzung von Metallen in einer nicht-recyclinggerechten Anwendung führt jedoch im Allgemeinen dazu, dass die in den entsprechenden Produkten enthaltenen Metalle nicht durch bestehende Recyclingsysteme erfasst werden und somit diese der Technosphäre verloren gehen. Dies ist beispielsweise der Fall, wenn Metalle oder ihre Verbindungen nicht gebraucht, sondern verbraucht werden (z.B. in Düngern) oder sie im Rahmen von Recyclingprozessen¹⁵ in Schlacken verlorengehen. Weiterhin findet häufig ein Downcycling statt, beispielsweise wenn Legierungen zunehmend mit anderen Metallen und Legierungen vermischt werden und damit nurmehr eine minderwertigere Nutzung möglich ist. In manchen Fällen werden Metallverbindungen auch gezielt in die Biosphäre eingebracht, z.B. in Form von Düngemitteln oder Pestiziden.

Da die Rezyklierbarkeit durch die Art und Weise der Verwendung beeinflusst wird, sollte die Einsatzweise als Kriterium berücksichtigt werden, um die Auswahl der „umweltrelevanten seltenen Metalle“ in diesem Arbeitsschritt zu unterstützen. Dementsprechend werden folgende Einsatzweisen als Kriterien unterschieden:

- (a) feine Verteilung von Metallen durch *feine Verteilung von Produkten*;
- (b) feine Verteilung von Metallen durch *feine Verteilung in Produkten*;

¹⁵ Es handelt sich bei derartigen Recyclingprozessen in der Regel um solche, die auf andere Stoffe ausgerichtet sind.

(c) feine Verteilung von Metallen durch *dissipative Produktnutzung*.

Erläuterungen der obengenannten Einsatzweisen:

- (a) feine Verteilung von Metallen durch *feine Verteilung von Produkten* liegt vor, wenn die metallführenden (Klein-)Produkte fein in der Technosphäre verteilt sind. Dies kann durch das Vorkommen einer Vielzahl derartiger Produkttypen, Produktgruppen¹⁶ oder Anwendungsbereiche¹⁷, in denen das Metall eingesetzt wird, verstärkt werden. Da Sammellogistik häufig entlang spezifisch für Produkttypen etc. organisiert wird, wird aufgrund der Addition des Sammelaufwands für die verschiedenen Produkttypen etc. die gezielte Sammlung dieser metallführenden Produkte erschwert; bei Einsatz eines Produkttyps in verschiedenen Sektoren kann unter Umständen der Aufbau von getrennten Sammelsystemen (für die Sektoren) erforderlich sein;
- (b) feine Verteilung von Metallen durch *feine Verteilung in Produkten* liegt vor, wenn die Menge des Metalls sehr gering ist, welche in den einzelnen Produkten eingesetzt wird. Selbst bei Sammlung von sortenreinen Fraktionen der Altprodukte („Altschrotte“) sind die Konzentrationen bezogen auf das Produkt niedrig und eine Rezyklierung erschwert;
- (c) feine Verteilung von Metallen durch *dissipative Produktnutzung* liegt vor, wenn durch den Einsatz der metallführenden Produkte eine praktisch unumkehrbare Verstreuung von Metall stattfindet (in der Regel in die Umwelt oder in andere Stoffe¹⁸), z.B. durch Verbrauch¹⁹ bzw. Verschleiß. Ein Rezyklieren ist hier nicht möglich.

Obwohl die Konzentrationen meist (sehr) niedrig sind, können aufgrund hoher Stückzahlen die gesamten Metallfrachten relativ groß sein und für die Kreislaufführung der Metalle von Relevanz. Hohe Stückzahlen können dabei den Sammelaufwand erhöhen. Häufig treten die Fälle (a) und (b) in Kombination auf.

¹⁶ z.B. Kupfer in EuE

¹⁷ z.B. Zink in der Galvanisierung, in Legierungen, als Konstruktionswerkstoff, in EuE-Bauteilen, als Füllstoff oder als Futtermittel

¹⁸ z.B. Bleioxid in Bleiglas, Antimon als Flammschutzmittel, Gallium als Halbleiter

¹⁹ z.B. Kupfersulfat als Futtermittel/Düngemittel; Einsatz in der Pyrotechnik, als Stabilisator, Füllstoff, Farbstoff, Glasbilder, in Form von Salzen in der Landwirtschaft

Im Rahmen des Screenings wurde für verschiedene Produktgruppen bestimmt, welche Einsatzweisen der feinen Verteilung von Metallen auftreten. Diese wurden verschiedenen Produktgruppen zugeordnet, deren Funktionalität durch diese „Spurenstoffe“ mitbestimmt werden (funktionaler Einsatz). Diese Anwendungen sind: Stähle, Carbide, Metalle zur Oberflächenbeschichtung, Katalysatoren, Glasprodukte, Metalle in EuE-Produkten, Schmuck und Dentalbedarf. Die Ergebnisse sind tabellarisch in Anhang 3 zusammengestellt.

Es wurde ein weiteres Screening der Metalle hinsichtlich feiner Verteilung durchgeführt (vgl. Tab. 2-10 und Anhang 3); hierbei zeigte sich, dass nur wenige Stoffströme quantifiziert sind bzw. nur wenige Informationen im Internet frei zugänglich sind: Metalle wurden dann als „feinverteilt“ eingestuft, wenn ein relevanter Anteil der Nutzung zu feiner Verteilung des Metalls führt, unabhängig vom zugrundeliegenden Mechanismus (vgl. obengenannte Einsatzweisen (a), (b) und (c)).

Einsatzweise (a) lässt sich unterteilen in zwei Fälle: einen ersten (a1) mit ausgeprägter Verteilung eines bestimmten Produkttypes in der Technosphäre, und einen zweiten (a2) mit Verteilung des Einsatzes auf diverse Produkttypen bzw. Anwendungsbereiche. Diese Argumentation sei an zwei Metallen verdeutlicht:

- Cadmium wird vor allem in wiederaufladbaren Batterien eingesetzt. Es könnte durch Sammlung und Recycling aus diesen Batterien leicht rückgewonnen werden. Aufgrund des geringen Preises für Cadmium bestehen jedoch keine wirtschaftlichen Anreize dafür²⁰, diese Akkumulatoren separat zu sammeln. Auch ist das Verbraucherbewusstsein zur Separatsammlung von Akkumulatoren (bei Vorhandensein eines Recyclingsystems) wenig ausgeprägt → Fall (a1);
- Rhodium wird eingesetzt in Fahrzeug-Katalysatoren, Spiegeln, Scheinwerfern, in temperaturstabilen Kupplungen, Zündkerzen, Heizungsbrennelementen, Nylonscheren und Schweißgeräten. Aufgrund dieser großen Vielfalt an Produktgruppen erscheint es unrealistisch, dass diese unterschiedlichen Produkte unter aktuellen Bedingungen einem Rhodium-Recycling zugeführt werden können → Fall (a2).

Es ist festzuhalten, dass die meisten Metalle durch die Nutzung eine feine Verteilung erfahren und teils dissipativ eingesetzt werden. Metalle mit deutlich feiner Verteilung sind in Tab. 2-10 zusammengefasst.

²⁰ Zudem ist der Einsatz von Cadmium in Batterien seit 2009 durch das Batteriegesetz (BattG) geregelt, was direkte Auswirkungen auf die wirtschaftlichen Anreize hat.

Tab. 2-10: Anwendungsbereiche der Metalle mit deutlich feinverteiltem Einsatz: Angabe des Massenanteils in den diversen Anwendungsbereichen. Bezugsjahr 2007 (wenn nicht anders angegeben)

Metall	Verwendung der Metalle weltweit bzw. in den Vereinigten Staaten
Antimon	Welt: 75 % für Flammschutzmittel USA: 40 % für feuerhemmende Mittel, 14 % für Chemikalien; 11 % für Keramik und Glas (Angerer et al. 2008)
Beryllium	USA: 50 % für IuK-Produkte, 50 % für Luftfahrt, Militär, Automobilelektronik und Sonstiges
Bismut	USA: 47 % Stahladditive; 34 % schmelzbare Legierungen, Lötmetalle und Munition; 18 % Chemie und Pharmazie
Cadmium	USA: 83 % für Batterien; 8 % für Pigmente; 7 % Beschichtungen; 7 % Kunststoffstabilisierer
Gallium	USA: 66 % für IC; 20 % Optoelektronik (unter anderem LED, PV); 14 % Forschung, Spezialstähle u.a.
Germanium	Welt: 35 % Glasfaseranwendungen; 30 % Infrarot Anwendungen; 15 % Polymerkatalysatoren; 15 % Elektronik und Photovoltaik; 5 % Sonstiges; USA: 50 % Infrarot Anwendungen; 30 % Glasfaseranwendungen; 15 % Elektronik und Photovoltaik; 5 % Sonstiges; (USGS 2008).
Indium	Welt: 84 % ITO-Beschichtungen (zumeist LCD); 8 % Legierungen; 6 % Sonstiges; 2 % Halbleiter und elektronische Komponenten USA: 70 % Beschichtungen (zumeist LCD); 12 % EuE-Bauteile (inkl. Photovoltaik); 12 % Lötmetalle und Legierungen; 6 % Forschung und Sonstiges; (Angerer et al. 2008)
Lithium (Salze)	Welt: 20 % Batterien; 20 % Keramik und Gläser; 16 % Schmierfette; 9 % Pharmazie und Polymere; 8 % Klimatechnik; 6 % Aluminiumherstellung, 21 % Sonstiges (USGS 2008)
Kalium (Salze)	Kaliumcarbonat / USA: 85 % Düngemittel
Natrium (Salze)	Natriumsulfat / USA: 46 % Seifen und Detergentien; 13 % Papierherstellung; 13 %; Textilherstellung; 12 % Gläser; 7 % Teppich-Reiniger, 11 % Sonstiges (USGS 2008) Natriumcarbonat / USA: 50 % Glasherstellung; 29 % Chemikalien; 9 % Seifen und Detergentien; 4 % Nahrung; 3 % Sonstiges; 2 % Papierherstellung; 1 % Wasserbehandlung (USGS 2008)
Rhodium	Welt: 85 % für Autokatalysatoren (Lenntech o.J.); 0,2 t EuE (2002) (Wilburn o.J.:67)
Selen	Welt (2003): 35 % Glasherstellung; 20 % Chemikalien und Pigmente; 12 % Elektronik und Kopiertechnik; 33 % Sonstiges (Matons und George 2005)
Seltene Erden	USA (2006): 25 % Kfz-Abgaskatalysatoren; 22 % Erdölindustrie/Katalysatoren; 20 % Legierungen; 11 % Glasreiniger und Keramik; 10 % Leuchtstoffe; 10 % Magnete; 3 % Medizin und Laser
Strontium	USA: 43 % Pyrotechnik; 26 % Eisenoxid-Keramik-Magnete; 10 % Legierungen; 7 % Pigmente und Füllstoffe; 6 % Zinkherstellung; 8 % Sonstiges
Tantal	Welt: 50-60 % EuE bzw. Kondensatoren, Rest nicht dokumentiert (TIC o.J., USGS 2008)
Titan	Titan (metallisch) / USA: 76% Luft- und Raumfahrt; 24% Sonstiges (USGS 2008). TiO ₂ -Verwendung / USA: 57 % Farben; 26 % Kunststoffe (Farben); 13 % Papier (weißer Füllstoff); 4 % Sonstiges (USGS 2008)
Wolfram	USA: 50 % Carbide; 50 % Sonstiges
Yttrium	USA: 84 % Lampen und Kathodenstrahlröhren (Bildröhren), 7 % Elektronik, 7 % Keramik, 2 % metallurgische Verwendung
Zink	USA: 55 % Galvanisierung, 21 % Legierungen, 16 % Messing und Bronzen, 8 % Sonstiges
Zinn	Welt: 50 % Lote; 18 % Weißblech; 14 % Chemikalien; 6 % Legierungen, 12 % Sonstiges USA: 26 % Dosen und Verpackungen, 24 % Elektrik; 10 % Konstruktion; 10 % Verkehrswesen; 30 % Sonstiges; (Angerer et al. 2008)

Quelle: USGS (2008) und andere Quellen (Welt)

Weniger deutlich ist der feinverteilte Einsatz für die folgenden Metalle dokumentiert: Arsen, Barium (Salze), Cer, Holmium, Lanthan, Neodym, Praseodym, Promethium, Quecksilber, Ruthenium, Samarium und Zirkon. Beispielsweise wird Samarium zur Dotierung von Laserkristallen, zur Herstellung von Spezialgläsern, von Keramiken und von Neutronenabsorbern in Kernreaktoren, aber auch in Permanentmagneten oder Elektroden von Lichtbogenlampen eingesetzt.

Keinen feinverteilten Einsatz weisen die „Massenmetalle“ Aluminium, Blei und Eisen auf: Zum einen bedeuten deren vergleichsweise großen Stoffströme, dass einzelne feinverteilt eingesetzte Produkte (z.B. Angelblei, Büroklammern, Aluminiumfolie) nicht stoffstromrelevant sind. Zum anderen treten bei diesen „Massenmetallen“ eher konstruktive Produkte (Stahlträger, Aluminiumprofile) oder massive Produkte (Blei-Akkumulatoren) auf. In Kombination mit den bereits weltweit vorhandenen Rezyklierungssystemen (inkl. Metallidentifikation, Sammlung, Rezyklierung) unterscheiden sich diese Metalle maßgeblich von den zuvor genannten. Calcium (Calciumoxid, massive Produkte im Gebäudebau), Promethium (in Atombatterien) und Thulium (in transportablen Röntgengeräten) werden in dieselbe Klasse eingestuft.

Weitere Vertreter, die nicht als feinverteilt angesehen werden, sogenannte „Grenzfälle“, sind Gold, Kupfer, Magnesium, Platin und Silber. Diese sind zwar in den Produkten in relativ geringen Mengen eingesetzt, doch nicht im beschriebenen Sinne feinverteilt²¹, da sie in relativ kompakter Form eingesetzt werden, Sammelstrukturen für diese in gewisser Weise bestehen und es attraktive finanzielle Anreize gibt, diese Metalle zu rezyklieren. Deutlich wird dies beispielsweise bei der Nutzung von Gold, Platin und Silber als Schmuck, bei dem es nur in Ausnahmefällen Materialverluste gibt. Im Gegensatz dazu werden große Mengen von Edelmetallen in der Elektronikindustrie und für Automobilkatalysatoren verwendet. Hierbei werden die Edelmetalle in sehr geringen Mengen in andere Stoffe eingebettet. Zudem bedarf es spezieller Recyclingtechnologien, um die Stoffe rückzugewinnen. Kupfer hingegen wird quantitativ in großen Mengen auch in EuE-Produkten genutzt. Auch hier wird das Kupfer mit anderen Stoffen vermischt, so dass eine Rückgewinnung des Kupfers durch Verhüttungstechnologien erfolgt. Bei Magnesium gibt es sowohl kompakte Nutzungen (Formteile aus Aluminium-Magnesium) als auch dissipative Verwendung (Entschwefelung in der Stahlherstellung, Titanherstellung), so dass auch die Verwendung von Magnesium nicht eindeutig zu klassifizieren ist. Aufgrund dieser Ambivalenz werden diese Metalle „Grenzfälle“ genannt.

²¹ Die Einstufung erfolgt hier pauschal für die jeweiligen Metalle; ein feinverteilter Einsatz in einzelnen Anwendungen wie beispielsweise EuE oder Autokatalysatoren ist durch die pauschale Einstufung hier nicht ausgeschlossen.

Einige Metalle konnten bisher nicht abschließend eingeschätzt werden und werden daher als „unbestimmt“ eingestuft. Darunter fallen Legierungsmetalle für nichtrostende Stähle, namentlich Chrom, Cobalt, Mangan, Molybdän, Nickel, Niob, Scandium und Vanadium. Gleiches gilt auch für Rhenium und Hafnium als Legierungsmetalle für Spezialstähle. Desweiteren gilt dies für Ruthenium, das sowohl in EuE-Produkten als auch in Katalysatoren für die chemische Industrie verwendet wird, sowie für Lutetium, die PGM (Gruppe) und Technetium. Die Stahlbildner werden beispielsweise in geringen Mengen zur Herstellung von Stählen eingesetzt. Aufgrund der hohen Schrottpreise existieren sowohl Sammelsysteme, als auch eine Vielzahl von Schrottklassifizierungen. Es ist jedoch nicht bekannt, in welchem Umfang die Stahlbildner einem Downcycling unterliegen, durch das sie kontinuierlich in mindere Stähle verbraucht werden. Bei den anderen Metallen fehlen zumeist Daten zur Verwendung, so dass sie nicht näher zugeordnet werden können.

Zusammenfassend ergibt sich aus den Betrachtungen folgende Klassifizierung in Bezug auf den feinverteilten Einsatz von Metallen (Tab. 2-11). Eine vollständige Darstellung der Ergebnisse ist in Kap. 10.2 (Anhang 2) aufgeführt.

Tab. 2-11: Klassifizierung der Metalle nach feinverteiltem Einsatz. Dunkelgrau sind jene Metalle dargestellt, bei denen der feinverteilte Einsatz deutlich ausgeprägt ist im Vergleich zu den anderen Metallen; Metalle mit „dissipativer Produktnutzung“ sind kursiv dargestellt.

Feinverteilter Einsatz		Unbestimmt	Kein feinverteilter Einsatz	
<i>Antimon</i>	<i>Arsen</i>	Chrom	Aluminium	Blei
<i>Beryllium</i>	<i>Barium (Salze)</i>	Cobalt	<i>Calcium (Oxid)</i>	Cäsium
Bismut	<i>Cer</i>	Hafnium	Dysprosium	Eisen
Cadmium	Holmium	Lutetium	<i>Erbium</i>	Europium
Gadolinium	Lanthan	Mangan	Germanium	Gold
Gallium	Neodym	Molybdän	Iridium	Kupfer
Indium	Praseodym	Nickel	Magnesium	Osmium
<i>Kalium (Salze)</i>	Quecksilber	Niob	Palladium	Platin
Lithium (Salze)	<i>Rubidium</i>	PGM	Promethium	Silber
<i>Natrium (Salze)</i>	Samarium	Rhenium	<i>Tellur</i>	Terbium
<i>Rhodium</i>	Zirkon	Ruthenium	Thallium	Thulium
<i>Selen</i>		Scandium	Ytterbium	
<i>Seltene Erden</i>		Technetium		
<i>Strontium</i>		Vanadium		
Tantal				
Titan (Oxid)				
Wolfram				
<i>Yttrium</i>				
Zinn				
<i>Zink</i>				

Zur Auswahl der vertiefend zu untersuchenden Metalle ist das Kriterium 7 grundsätzlich aussagekräftig. Allerdings kann dieses Kriterium nur als zusätzliches einbezogen werden mangels verlässlicher Daten über die weltweite (durchschnittliche) Einsatzweise der Metalle (Datenlücken).

Im Folgenden soll deshalb versucht werden, „Hot-Spots“ der dissipativen Verwendung in einzelnen Produkten zu identifizieren (vgl. Anhang 3).

2.3 Begriffsbestimmung „umweltrelevante Metalle“

Die Umweltrelevanz von Metallen ist bislang nicht ausreichend definiert. In Bezug auf Metalle umfasst der Begriff „Umweltrelevanz“ jene Aspekte, die relevant sind hinsichtlich der Umwelteinflüsse – im Allgemeinen entlang des kompletten Lebenswegs der Metalle. Welche Aspekte relevant sind, ist zwar für Einzelfragen untersucht, jedoch

noch nicht hinreichend hinsichtlich der Breite der Fragestellungen in Arbeitsschritt 2.1. Die verschiedenen Aspekte können durch Indikatoren bzw. Wirkungsgrößen beschrieben werden. Diese Indikatoren lassen sich unterscheiden in inputbezogene Indikatoren und outputbezogene Indikatoren. Outputbezogene Indikatoren (Outputindikatoren) umfassen beispielsweise CO₂-Äquivalente (CO₂-Äq.), SO₂-Äquivalente (CO₂-Äq.), Nitrate etc., also Schadstoffe, die bei den entsprechenden Prozessen freigesetzt werden. Demgegenüber umfassen inputbezogene Indikatoren den Material- oder Energieaufwand, der mit der Metallproduktion verbunden ist. Daneben existieren sogenannte aggregierte Umweltindikatoren wie die Umwelteinwirkungsbelastung (UEBEL) oder der umweltgewichtete Materialverbrauch (engl.: *Environmentally weighted Material Consumption*, EMC), die durch (gewichtete) Aggregation von einzelnen Indikatoren bzw. Umweltbelastungspotenzialen des Materialverbrauchs bestimmt werden.

Die Auswahl geeigneter Indikatoren ist naturgemäß normativ geprägt und hat sich an der Zielvorgabe des Auswahlprozesses zu orientieren. Eine Metallauswahl nach dem Kriterium der „Umweltrelevanz“ ist relativ unspezifisch und lässt einen entsprechend großen Entscheidungsraum zu. Zur Unterstützung einer zielsicheren Interpretation soll die Anzahl der Indikatoren bzw. Kriterien gering sein. Aufgrund bisheriger Ergebnisse²² wurden Indikatoren wie der Kumulative Energieaufwand (KEA), der Kumulierte Rohstoffaufwand (KRA) oder der Globale Materialaufwand (engl.: *Total Material Requirement*, TMR) als richtungssichere²³ Größen erkannt, die zumindest teilweise für die Metalle auch verfügbar sind.

2.3.1 Inputindikatoren

Inputbezogene Indikatoren umfassen den Material- oder Energieaufwand, der mit der Metallproduktion verbunden ist. Da bei der Produktion der Metalle vielfältige Maschinen, Industrieanlagen etc. erforderlich sind, gelangen eine Vielzahl von Stoffen zum Einsatz. Detaillierte Angaben der eingesetzten Stoffmengen wie sie beispielsweise in Lebenszyklusinventaren (engl.: *Life Cycle Inventories*, LCA) aufgeführt sind, wären aufgrund der Datenfülle schwierig zwischen den Metallen vergleichbar. Demgegenüber bieten Kennwerte als Summenparameter weniger Details ab und sind damit richtungssicherer zu interpretieren.

²² Untersuchung des ifeu-Instituts zur Korrelation von Outputindikatoren und Inputindikatoren auf Basis von 130 Umweltprofilen (unveröffentlicht)

²³ „Richtungssichere Größe“ bedeutet in diesem Zusammenhang, dass diese Indikatoren allgemeinen Belastungspotenzials mehrere spezifische Indikatoren gebündelt mit abbilden; dabei ist zu beachten, dass nicht alle spezifischen Umweltwirkungen quantifiziert beschrieben vorliegen; in diesem Fall korrelieren die inputorientierten Indikatoren allgemeinen Umweltbelastungspotenzials großteils mit outputbezogenen Indikatoren, beispielsweise CO₂, SO₂, u.a.

Hinsichtlich der Metallauswahl sind sowohl (i) die Wahl der Indikatoren bzw. Kennwerte als auch (ii) deren Betrachtungsebene von entscheidender Bedeutung:

(i) Eine Auswahl der Indikatoren bzw. Kennwerte ist stets normativ geprägt, von Prioritätensetzungen abhängig und hat im Hinblick auf die Projektziele zu erfolgen. Bisherige Arbeiten zeigten auf, daß Kennwerte wie KEA, KRA und TMR im Allgemeinen ausreichende Richtungssicherheit aufweisen. Die energieverbrauchsbezogenen Kennwerte weisen auch eine Korrelation zu vielen spezifischen Wirkungsgrößen (Kohlendioxid, Stickoxide etc.) auf, die aus dem Einsatz fossiler Brennstoffe resultieren.

Da die Umweltrelevanz in Relation zu anderen Metallen zu beurteilen ist, bedarf es Kennwerten, die möglichst alle in Frage kommenden Metalle abdecken können. Zur Bestimmung der Umweltrelevanz wurden der KRA bzw. KEA ausgewählt, deren Werte unter anderem in einem zeitgleich laufenden Forschungsvorhaben des Umweltbundesamtes²⁴ ermittelt wurden. Zusätzlich wurde der TMR ausgewählt, da KRA und KEA für nur etwa die Hälfte der Metalle vorliegen. Weiterhin erlaubt der TMR eine Plausibilitätsprüfung der KRA-Einstufung.

Zudem ist zu berücksichtigen, dass der KRA primär ökonomisch definiert ist (es wird nur die ökonomisch verwertete Rohstoffentnahme gezählt), während der TMR die gesamte kumulierte Ressourcenentnahme enthält, und damit zusätzliche Belastungen der natürlichen Umwelt darstellen kann (Bringezu et al. 2009).

(ii) In Bezug auf die Betrachtungsebene lassen sich die „spezifische Umweltrelevanz“ und die „absolute Umweltrelevanz“ unterscheiden:

- die „spezifische Umweltrelevanz“ bezieht sich auf die spezifischen Metalle und wird pro Tonne Metall ausgedrückt (für jeden der Kennwerte);
- die „absolute Umweltrelevanz“ wird pro (gesamter) weltweiter²⁵ jährlicher Produktionsmenge²⁶ des Metalls ausgedrückt. Es handelt sich also um das Produkt aus spezifischer Umweltrelevanz und der Tonnage der globalen Produktion des Metalls (für jeden der Kennwerte).

²⁴ Projekt „Indikatoren/Kennzahlen für den Rohstoffverbrauch im Rahmen der Nachhaltigkeitsdiskussion“, UFOPLAN-Vorhaben, FKZ 205 93 368; es wurden vorläufige Daten dieses Projektes im Rahmen der vorliegenden Studie verwendet.

²⁵ Da viele Metalle nicht durch den nationalen Gesamtverbrauch der einzelnen Metalle erfasst werden, sondern in relevantem Umfang in Form von Produkten zum Endverbrauch importiert werden, wird eine Klassierung der Umweltrelevanz von Metallen auf weltweiter Ebene als aussagekräftiger als auf

2.3.2 Outputindikatoren

Outputbezogene Indikatoren umfassen das Anfallen von Schadstoffen oder Abfällen, die bei der Produktion der Metalle. Dazu gehören sämtliche Luftemissionen (Treibhausgase etc.), Emissionen in Oberflächengewässer und Grundwasser. Aufgrund der grossen Vielfalt an Schadstoffen werden Indikatoren genutzt, um die Umweltwirkungen abzubilden, wobei die beitragenden Stoffe gemäss ihren Wirkfaktoren zusammengezählt werden können. Beispielsweise werden beim Treibhausgaspotential die Beiträge von Kohlendioxid, Distickstoffmonoxid und Methan aggregiert, indem sie jeweils mit Wirkungsfaktoren multipliziert werden; üblich ist hier die Darstellung in Form von Kohlendioxid-Äquivalenten ($\text{CO}_2\text{-Äq.}$). Analog wird beim Versauerungspotential verfahren ($\text{SO}_2\text{-Äq.}$). Demgegenüber würden Angaben zu einzelnen Emissionen einen sehr spezifischen Aspekt lediglich teilweise abdecken und sind daher nicht für die Aufgabenstellung geeignet.

Aufgrund des allgemeinen Verständnisses von Umweltrelevanz in dieser Studie und der oben erwähnten Richtungssicherheit der Inputindikatoren werden Inputindikatoren bevorzugt gegenüber Outputindikatoren.

nationaler Ebene eingestuft; in einer separaten Untersuchung könnte die Umweltrelevanz auf nationaler Ebene beachtet werden.

²⁶ Es handelt sich um die in Kap. 2.2.3 erläuterte Grösse „jährliche Produktionsmenge“ (Kriterium 3).

3 Einsatz von Metallen in den Bereichen Elektro- und Elektronikprodukte, Medizin und Nanotechnologie

Aufgrund der großen Bedeutung der Bereiche Elektro- und Elektronikprodukte, Medizin und Nanomaterialien für den Arbeitsschritt 2.1 wurde der Einsatz von Metallen in den Bereichen Elektro- und Elektronikprodukte, Medizintechnik und Nanotechnologie gezielt untersucht. Die Untersuchung erfolgte auf Basis einer Literaturrecherche.

Nachfolgend wird der Einsatz von Metallen in den drei Bereichen beschrieben:

- Elektro- und Elektronikprodukte (EuE) (Kap. 3.1);
- Medizintechnik (Med) (Kap. 3.2);
- Nanotechnologie (Nano) (Kap. 3.3).

3.1 Metalle in Elektro- und Elektronikprodukten

Es wurde zum Einsatz von Metallen in Elektro- und Elektronikprodukten eine Recherche anhand von Chemie-Datenbanken (Rutherford), Produktionsstatistiken (USGS 2008), Ökobilanzen von Informations- und Kommunikations (IuK)-Produkten (Behrendt et al. 1998, Soldera 1995), Datenbanken zu Elektrobauteilen (Elektro, Elko) sowie diverser wissenschaftlicher Publikationen durchgeführt. Demnach werden in EuE-Produkten fast alle stabilen Metalle eingesetzt²⁷.

Bei der Untersuchung ergaben sich folgende Schwierigkeiten:

- Eine Unterscheidung, welche Metalle in IuK-Produkten als Teil der EuE-Produkte vorkommen und welche Bedeutung sie für die IuK-Branche haben, erweist sich beim jetzigen Kenntnisstand als nicht möglich, da die Systemgrenzen hierbei sehr eng gezogen werden müssten. Ein Beispiel hierfür sind die Dotierungsmaterialien für die Glasfaser- und die Lasertechnologie wie z.B. Gallium, Germanium, Rubidium, Scandium, Yttrium und die Seltenen Erden. Diese können sowohl in IuK-Produkten (CD- und DVD-Geräte) als auch in der Opto-Elektronik zum Betrieb von Glasfasernetzen eingesetzt werden. Weitere Beispiele sind Leuchtstoffe in

²⁷ Lediglich für einige Lanthanide, Iridium, Osmium, Rhodium, Ruthenium und Vanadium konnten in diesem Screening keine Anwendungen in EuE-Produkten oder -bauteilen identifiziert werden.

Bildröhren (Europiumoxid), die Glasbildner (Barium-, Blei-, Bor-, Aluminium-, Calcium- oder Kaliumoxid) oder Dotierungsmetalle für Halbleiter (Lanthanide, Arsen, Antimon, Germanium, Gallium und Indium). Auch bei diesen Metallen ist eine Zuordnung, ob diese Metalle vorrangig in IuK- oder in anderen Elektroprodukten verwendet werden, nicht zu leisten.

- Bei der gegebenen Datenlage ist es problematisch, die Wichtigkeit (Bedeutung) der Metalle für die IuK- bzw. die EuE-Branche festzustellen. Bezogen auf die eingesetzte Menge sind Aluminium, Eisen, Kupfer, Nickel, Zink und Blei (Fernsehbildröhrengeräte) die häufigsten Metalle. Andere, teils in nur sehr geringen Mengen eingesetzte Metalle wie Beryllium, Europium, Indium, Tantal und die Platingruppenmetalle sind essentiell für die IuK-Technik, wie wir sie heute kennen.
- Aufgrund mangelnder Kenntnisse über jene Metalle, die in sehr geringen Mengen eingesetzt werden, wurden die Einsatzbereiche der Metalle (aller Metalle) in Bezug auf die Elektroindustrie recherchiert.

Anhand des Periodensystems wird nach Wichtigkeit differenziert aufgezeigt, welche Metalle in EuE-Produkten eingesetzt werden (Abb. 3-1).

Bei den Medikamenten wurden in erster Linie zugelassene Medikamente erfasst. Darüberhinaus wurden alternative Heilmittel, über die ausreichend Informationen vorlagen, zusätzlich aufgenommen und beschrieben, um ein möglichst vollständiges Gesamtbild zu erhalten²⁸. Bezüglich dem Einsatz von Metallen in der Diagnostik wurde nicht unterschieden, ob es sich um originäre Diagnostik (Identifizierung von Krankheiten) oder um Strahlentherapie (Behandlung von Krankheiten) handelt, da eine deutlich Abgrenzung anhand der vorliegenden Quellen im Allgemeinen nicht möglich war.

Einen Überblick über den Einsatz von Metallen in der Medizintechnik liefert Tab. 3-1.

Tab. 3-1: Einsatz von Metallen in der Medizintechnik mit Angabe nach Einsatzfeldern. Sofern in der Diagnostik oder Strahlentherapie Isotope verwendet werden, sind diese mit Massenzahl der Metalle ausgewiesen. Unbestimmt: keine Einsatzfelder dokumentiert

Einsatzfeld	Metall
Medikamente	Aluminium, Antimon, Calcium, Eisen, Germanium, Gold, Iridium (M)(unklar), Kalium, Kupfer, Lithium, Magnesium, Natrium, Platin, Quecksilber, Rhodium (M) (unklar), Selen, Silber, Zink
Diagnostik (einschliesslich Strahlentherapie)	Antimon, Barium, Cäsium-137, Cobalt-60, Eisen, Erbium-169, Gadolinium, Gallium-67/69, Indium-111, Mangan, Rhenium-186/188, Rhodium-106, Ruthenium-106, Samarium-153, Silber, Strontium-89/90, Technetium-99, Thallium-201, Yttrium-90
Prothetik	Barium, Chrom, Cobalt, Eisen, Gold, Molybdän, Nickel, Niob, Osmium, Platin, Quecksilber, Silber, Tantal, Titan, Zinn, Zirkon
Sonstige Einsatzfelder	Blei, Lanthan, Lithium, Selen, Silber, Titan, Zink
Einsatz von untergeordneter Bedeutung	Arsen, Palladium (P), Promethium (D) (unklar)
unbestimmt	Beryllium, Bismut, Cer, Dysprosium, Europium, Hafnium, Holmium, Neodym, Praseodym, Promethium, Rubidium, Scandium, Tellur, Terbium, Thulium, Vanadium, Wolfram, Ytterbium

Auf Basis dieser Recherche erfolgte eine halbquantitative Einschätzung des Materialeinsatzes, um die Relevanz des Einsatzes der Metalle in der Medizintechnik bzw. die Relevanz der Medizintechnik für die Metalle zu beschreiben. Die Ergebnisse in der folgenden Liste konnten jedoch nicht quantitativ unterlegt werden.

²⁸ Homöopathische Mittel wurden ausgenommen, da aufgrund der hohen Verdünnung nicht von relevanten Mengen ausgegangen wird.

- **Blei:** Bleimatten werden zur Abschirmung von Röntgenstrahlen eingesetzt. Diese Diagnostik ist weltweit sehr weit verbreitet. Hinsichtlich des Stoffstromes, der vor allem durch Bleibatterien geprägt wird, werden die Mengen zur Abschirmung als nicht relevant eingeschätzt.
- **Gold:** Gold wird vor allem als Zahnersatz eingesetzt. Hierbei handelt es sich um eine relativ materialintensive Anwendung hinsichtlich des gesamten Stoffstroms von Gold.
- **Lanthan:** Lanthan wird in Legierungen für Operationsbestecke eingesetzt. Es ist jedoch nicht abzuschätzen, ob dieser Einsatz mengenmäßig relevant ist.
- **Lithium:** Lithiumpräparaten wird eine antidepressive Wirkung zugeschrieben. Es handelt sich um zugelassene Medikamente. Vermutlich werden diese Präparate in großem Umfang eingesetzt. Aufgrund der großen Ressourcen an Lithium wird dieser Einsatz nicht als mengenrelevant eingeschätzt.
- **Natrium:** Kochsalzlösungen werden in großem Umfang als Infusionslösungen eingesetzt. Aufgrund der großen Ressourcen an Natrium wird dieser Einsatz nicht als mengenrelevant eingeschätzt.
- **Osmium:** Osmium wird in Herzklappen und Herzschrittmachern eingesetzt. Angesichts der geringen jährlichen Fördermengen könnten diese Anwendungen durchaus relevant für den Stoffstrom von Osmium sein; für eine Abschätzung der Mengenrelevanz reicht die Datenlage jedoch nicht aus.
- **Platin:** Platin wird in Herzklappen, Herzschrittmachern und in Medikamenten eingesetzt. Es ist jedoch nicht abzuschätzen, ob diese Anwendungen für den Stoffstrom von Platin mengenmäßig relevant sind.
- **Quecksilber:** Amalgam ist weltweit das bedeutendste Zahnfüllungsmaterial. Es enthält neben Silber und Zinn auch Quecksilber. Der Stoffstrom wird als bedeutend eingeschätzt.
- **Selen:** Selenverbindungen werden in Schuppenshampoos eingesetzt. Hierbei handelt es sich um eine relativ materialintensive Anwendung hinsichtlich des gesamten Stoffstroms von Selen.
- **Silber:** Amalgam ist weltweit das bedeutendste Zahnfüllungsmaterial. Es enthält neben Quecksilber und Zinn auch Silber. Daneben werden zunehmend Wundverbände mit Nano-Silber eingesetzt. Ebenso wird Silberbromid auf

Röntgenfilmen eingesetzt. Angesichts der relativ geringen Reserven an Silber wird dieser Stoffstromanteil als relevant eingeschätzt.

- **Tantal:** Tantal wird in Implantaten eingesetzt. Es ist jedoch nicht abzuschätzen, ob dieser Einsatz mengenmäßig relevant ist.
- **Titan:** Titan wird in Prothesen und Implantaten eingesetzt. Aufgrund der großen Ressourcen an Titan wird dieser Einsatz nicht als mengenrelevant für den Stoffstrom von Titan eingeschätzt.
- **Zink:** In Sonnenschutzcremes und anderen Cremes im medizinischen Bereich ist Zink ein wichtiger Wirkstoff. Es wird daher von einem relativ hohen Einsatz ausgegangen. Bezogen auf den Stoffstrom des Zinks wird dieser Anteil dennoch mengenmäßig als nicht relevant eingeschätzt.
- **Zirkon:** Zirkonoxid wird in Prothesen und Implantaten eingesetzt. Im Verhältnis zu anderen Verwendungen von Zirkon, z.B. in feuerfesten Steinen, wird dieser Anteil des Stoffstroms als von untergeordneter Bedeutung eingeschätzt.

Darüber hinaus existieren in der Medizin einige Spezialanwendungen der Lasertechnologie. Es ist ungeklärt, ob diese für die Stoffströme der Metalle relevant sind. Ausgewählte Spezialanwendungen werden im Folgenden beschrieben:

- Erbium-Laser werden von Hautärzten zum präzisen Abtrag von Hautveränderungen eingesetzt, zur Narbenbehandlung oder zur Faltenglättung. In der Zahnheilkunde werden Erbium-Laser bei der schmerzarmen Kariespräparation und der Desinfektion von Implantaten verwendet, in der Parodontologie bei der schonenden Entfernung von Ablagerungen (vgl. www.bio-pro.de/de/region/ulm/magazin/03004/index.html).
- Holmium wird in YAG-Holmium-Lasern für arthroskopische Eingriffe an Knorpel und an Schleimhäuten eingesetzt. Ebenso werden Holmium-Laser für die Zertrümmerung von Nierensteinen verwendet.
- Neodym-dotierte Yttrium-Aluminium-Granat-Laser (Nd:YAG-Laser) werden für die Behandlung von Hämangiomen (Blutschwämme) eingesetzt, da ihre Wellenlänge von rotem Hämangiomgewebe gut absorbiert wird und nur schlecht von Wasser, das ein wesentlicher Bestandteil des umliegenden Gewebes ist. Ebenso findet dieser Lasertyp in der Augenheilkunde Anwendung, um die Regenbogenhaut im Rahmen einer Glaukomerkrankung zu perforieren (Iridotomie), um einen Nachstar zu entfernen, bei Netzhauterkrankungen oder zur Verbesserung des

Technologie- und Entwicklungsfeld, doch im Gegensatz zu sogenannten Basistechnologien wie Mikroelektronik und Biotechnologie nicht eindeutig abgrenzbar ist.

Die Reduktion der Partikelgröße unter 100 Nanometer bewirkt aufgrund des grossen Oberflächen-Volumen-Verhältnisses neuartige Materialeigenschaften. Darüber hinaus treten Selbstorganisations-Phänomene auf, d. h. nanoskalige Strukturen können sich unter bestimmten Umständen selbst ordnen. Nanotechnologie kann im weiteren Sinne auch kleinste Strukturen bis auf Atomebene umfassen; versteht man Nanotechnologie in diesem weiteren Sinn, so umfasst sie die gesamte bekannte Halbleitertechnik, die Chemie der Komplexe, die organische Chemie (inklusive Pharmazeutika) sowie die Solartechnologie. Zur Differenzierung gegenüber anderen oben genannten Bereichen, sollte Nanotechnologie die Herstellung von Molekularkomplexen kleiner 100 Nanometer umfassen, welche unter natürlichen Umständen weitgehend stabil sind.

Wirkungsspektrum und Einsatzbereiche

Charakteristisch für Nanomaterialien ist, dass sie aufgrund der geringen Grösse der Molekularkomplexe Eigenschaften entfalten, welche übliche Materialien nicht aufweisen, die aus denselben chemischen Stoffen bestehen. In der Forschung und den kommerziell angebotenen Produkten dominieren unter dem Stichwort Nanotechnologie zurzeit die besonderen Oberflächen-, Absorptions- und katalytischen Eigenschaften, wenngleich Nanoteilchen weitere funktionelle Eigenschaften aufweisen als die drei genannten. Nanomaterialien können Oberflächen härten (ultraharte Autolacke), Schmutzablagerungen vermeiden (katalytische Farben), Wasser filtern, Schadstoffe entfernen (Wandfarben), die Zerlegung von Schadstoffen verbessern (besser als bisherige Katalysatoren) (Rußfilter, Kohlenmonoxidfilter), die Mischbarkeit von Stoffen erhöhen (Pharmazeutika, Kosmetika), die Speicherung von Energie verbessern (Lithiumzellen) und vieles mehr.

Die möglichen und teilweise bereits seit über 40 Jahren realisierten Anwendungen der Querschnittstechnologie Nanotechnologie (Disziplin der Physik, Chemie, Maschinenbau, Lebensmitteltechnologie; verschiedene Verfahren, Branchen, Produkte) weisen ein breites Spektrum auf. So kommt Nanotechnologie z.B. im Bereich der Photovoltaik (selbstreinigende Oberflächen, Dünnschichtzellen), der Mikroelektronik (hier besonders im Automobilbereich), der Halbleiter- und Optoelektronik (LED und OLED) sowie im Bereich Lebensmittel, Kosmetika und Gebrauchsgüter/Verpackungen zum Tragen. Im Bereich der Medizin sind mittels Nanopartikeln neue Diagnose- und Therapiemöglichkeiten erschließbar.

Die industrielle Anwendung der Nanotechnologie ist insbesondere im Bereich der Funktionalisierung oder Veredelung von Oberflächen relativ weit fortgeschritten. Hier werden die besonderen Oberflächeneigenschaften – beispielsweise von Nanoverbund-

schichten – genutzt und auf diese Weise verbesserte mechanische und tribologische Eigenschaften erzielt. Bekannte Beispiele sind nicht-reflektierende oder selbst-reinigende Oberflächen (Lotus-Effekt) oder kratzfeste und langlebige Nanolacke. Auch im Rahmen der Produktion von chemischen bzw. pharmazeutischen Erzeugnissen zielt die Nanotechnologie auf ein relativ weit entwickeltes Anwendungsgebiet. Schon seit einiger Zeit werden Nanopartikel (z.B. aus Carbon Black, Titandioxid, Eisenoxid und Zinkoxid) in unterschiedlichsten Formen als Katalysatoren in der Produktion und in diversen Anwendungsbereichen eingesetzt, um die allgemeine Reaktionsausbeute und Reaktionsgeschwindigkeit zu erhöhen.

Der Einsatz von Metallen in der Nanotechnologie ist in den vergangenen Jahren rasant angewachsen; inzwischen sind über 500 derartige Produkte am Markt berichtet worden (Spiegel 2008:148). Im Folgenden wird ein Überblick über den Einsatz von Metallen in der Nanotechnologie gegeben (derartige Anwendungen im Bereich Elektro- und Elektronikprodukte sind in Kap. 3.1 berücksichtigt). Ferner beschränkt sich die nachfolgende Aufstellung auf Anwendungen, die bereits technisch in die Praxis umgesetzt worden sind bzw. die kommerziell verfügbar sind (eine Vielzahl von Nanoprodukten befindet sich derzeit noch in der Testphase und ist noch nicht kommerziell verfügbar). Im Folgenden sind ausgewählte Anwendungen pro Metall aufgeführt:

- **Aluminium:** (1) In Vakuumisulationspanelen kann eine Aluminium-Schicht eine höhere Wärmedämmung bewirken. Hierbei wird hochporöses evakuiertes nano-strukturiertes SiO_2 mit Aluminium kombiniert. Diese Panele werden zur energetischen Sanierung von Gebäuden verwendet. (2) Mittels Nanofiltration kann Wasser aufbereitet und von gesundheitsschädlichen organischen, biologischen und anorganischen Stoffen gereinigt werden. Hierbei werden unter anderem Aluminiumoxid-Nanofasern eingesetzt (Bachmann et al 2007:21, 34);
- **Cer:** (1) Ceroxid wird als Katalysator zur besseren Verbrennung von Kraftstoffen eingesetzt (Bachmann et al 2007:96). (2) Mit Ceroxid beschichtete Kohlenstoff-röhren werden eingesetzt, um Arsen und andere Schwermetalle aus dem Wasser zu filtern (Bachmann et al 2007:22);
- **Eisen:** (1) Eisenteilchen in Nanoform werden zur hochkratzfesten Parkettver-siegelung eingesetzt. (2) Nullwertiges Eisen in Nanoform wird zur Bodenreinigung von Kohlenwasserstoffen eingesetzt (Bachmann et al 2007:23-24/35). (3) Nano-skaliger Magnetit (Eisenoxid) wird zur Filterung von Arsen aus Wasser eingesetzt (Bachmann et al 2007:25);
- **Mangan:** (1) Ebenso wie Zink und Titan wirkt auch Mangandioxid photokatalytisch (Bachmann et al 2007:35). Poröse Nanofasern mit Mangandioxid können

Luftschadstoffe zersetzen. (2) In der Akkumulatorentechnik wird durch nanoskalige Mangankomplexe (ebenso Titan oder Aluminium) eine höhere Speicherdichte für Energie erhalten (Bachmann et al 2007:97);

- **Platin:** Platin wird in nanoskaliger Form in Katalysatoren eingesetzt (Bachmann et al 2007:25);
- **Rhodium:** Rhodium wird in nanoskaliger Form in Katalysatoren eingesetzt (Bachmann et al 2007:25);
- **Seltenerdmetalle:** Die meisten Seltenen Erden werden in nanoskaliger Form für LED oder OLED eingesetzt. Zahlreiche Firmen bieten verschiedene Oxide für diese Zwecke an, beispielsweise die Oxide von Cer, Erbium, Europium, Neodym, Praseodym, Gadolinium und Samarium (vgl. <http://www.os-materials.com>);
- **Silber:** Silber ist das am häufigsten eingesetzte Metall in der Nanotechnologie. In den Vereinigten Staaten sollen schon über 200 Produkte mit Nanosilber ausgestattet sein (Bachmann et al 2007:32). Aus den fein verteilten Silberpartikeln werden Silberionen freigesetzt, die eine stark antibakterielle Wirkung entfalten, indem sie Enzyme des bakteriellen Energiestoffwechsels blockieren und in die Atmungskette sowie genetischen Prozesse von Mikroorganismen eingreifen, hingegen im relevanten Konzentrationsbereich für den Menschen unbedenklich sind (Bachmann et al 2007:26). Diese antibakteriellen Eigenschaften werden ebenso für Gebrauchsgegenstände erreicht. (1) Eine Anwendung der antibakteriellen Eigenschaften ist Funktionsbekleidung (Unterwäsche) mit Silbernanopartikel in den Faserstoffen. Hierdurch ist es möglich, dass die Kleidung geruchsfrei bleibt, da die Bakterien, die Körperschweiß umwandeln, sich nicht auf dem Trägermaterial ansiedeln können. (2) Inzwischen gibt es Raumluftfilter mit Silber (Bachmann et al 2007:51). (3) Durch den Zusatz nanoskaliger Silberpartikel lassen sich Wandfarben oder Klarlacke mit antimikrobiellen Eigenschaften ausstatten. (4) Mit Silber-Nanoschichten kann eine Verbesserung der Wärmereflexion von Gläsern erreicht werden, da diese Schichten Infrarot reflektierend sind. Derartige Glasscheiben verhindern deutlich die Wärmeeinstrahlung in Gebäude;
- **Titan:** Titandioxid scheint neben Silber das am häufigsten in der Nanotechnologie eingesetzte Metall zu sein. Die wesentlichen Eigenschaften, die hierbei genutzt werden, sind die photokatalytischen Eigenschaften von Titan. Hiermit wird das Vermögen von Titan bezeichnet, andere Substanzen dergestalt zu binden, dass sich diese unter Licht zersetzen (Bachmann et al 2007:25). (1) Titandioxid wird deshalb vor allem zur Entwicklung schmutzabweisender Oberflächen eingesetzt – d. h. im Sinne von selbstreinigenden Oberflächen. Die photokatalytischen Anwendungen auf Basis nanostrukturierter Titandioxidschichten bieten Potenziale,

um die Verschmutzung von Fahrbahnmarkierungen, Verkehrsschildern, Straßen- und Tunnelbeleuchtungen zu reduzieren. (2) Eine weitere Anwendung ist, Beton mit Nanomaterialien zu beschichten oder Titandioxidnanopartikel in den Beton einzubauen, so daß z.B. Betonfassaden nicht mehr so stark verschmutzen (Selbstreinigungseffekte durch superhydrophile Titandioxidbeschichtungen). (3) Ebenso können superhydrophile Oberflächen auf Gläsern und Spiegeln hergestellt werden, die ein Beschlagen von Fenstern und Spiegeln vermeiden, die Lichtstreuung reduzieren und biozid wirken. (4) In photokatalytischen Wandfarben vermögen Titandioxidpigmente Luftverunreinigungen zu beseitigen und so das Raumklima zu verbessern. Inzwischen werden Raumlufthfilter mit Titandioxid angeboten (Bachmann et al 2007:51). (5) Ebenso wird Titandioxid in der Solartechnologie genutzt. In Farbstoffsolarzellen bewirken mit Farbstoffmolekülen dotierte Titandioxidpartikel einen schnellen Ladungstransport;

- **Zink:** Zinkoxid ist ein sehr verbreiteter Schutz vor Ultraviolett (UV)-Strahlungsexposition (Sonnenschutz). Während Sonnencremes in der Vergangenheit aufgrund der inhomogenen Verteilung weiß waren, sind sie heute häufig durchsichtig, da das Zinkoxid in Nanopartikeln in den Cremes verteilt ist. Aufgrund der häufigen Nutzung von Sonnencremes ist diese Verwendung überaus bedeutsam;
- **Zirkonium:** Neben Platin und Rhodium wird Zirkonium in nanoskaliger Form in Katalysatoren eingesetzt (Bachmann et al 2007:25).

4 Auswahl von Metallen zur vertiefenden Untersuchung

Aufgrund einer wachsenden Anzahl von Metall-Rankings und dem Bestreben, diese miteinander zu vergleichen, ist es wichtig, jeweils die Zielsetzung und damit die Auswahlkriterien zu beachten. Bisher wurden Größen der Umweltrelevanz kaum herangezogen. Hingegen ist die statische Reichweite als einfache Messgröße der Verfügbarkeit ein häufiges Kriterium. Das Metall-Ranking in dieser Studie zielt darauf, die bisher kaum beachteten (da „seltenen“), umweltrelevanten Metalle zu bestimmen – im Gegensatz zu anderen bekannten Metall-Rankings.

4.1 Kriterienauswahl zur Bestimmung „Seltener Metalle“

Im Themenfeld „seltene Metalle“ wurden insgesamt die folgenden sieben Kriterien geprüft, die ausführlich in Kapitel 2.2 beschrieben sind:

- Kriterium 1: Reservemenge: Metalle mit geringen Reserven;
- Kriterium 2: Statische Reichweite: Metalle mit geringer statischer Reichweite;
- Kriterium 3: Jährliche Produktionsmenge: Metalle mit geringer Produktion;
- Kriterium 4: Rohstoffpreis: Metalle mit hohem Preis;
- Kriterium 5: Produktionskonzentration: Metalle mit hoher geographischer Konzentration der Produktion;
- Kriterium 6: Reservenkonzentration: Metalle mit hoher geographischer Konzentration der Reserven;
- Kriterium 7: Feinverteilung von Metallen.

In der folgenden Tabelle sind die Kriterien synoptisch zusammengefasst (Tab. 4-1); zur besseren Übersicht wurden die Original-Klassenbezeichnungen verallgemeinert und durch das Begriffspaar „selten/häufig“ ersetzt. Nicht erfasst durch diese Zusammenfassung sind:

- Kriterium 4: bislang konnte dies Kriterium aus methodischen Gründen nicht klassifiziert werden, vgl. Kap. 2.2.4;
- Kriterien 7 und 8: diese Kriterien werden nicht dargestellt, da ihre Klassen nicht das erforderliche Ordinalniveau aufweisen.

Tab. 4-1: Übersicht der Klassifizierung der diversen Kriterien. Die Bezeichnung der Kategorien (Klassen) wurde vereinheitlicht.

Kategorie	Reservenmenge [t]	Statische Reichweite [a]	Jährliche Produktion [t]	Produktions- konzentration	Reserven- konzentration
äußerst seltene Metalle	< 10.000	< 12,5 a	< 100	> 75 % in einem Land	> 75 % in 1 Land
sehr seltene Metalle	< 100.000	< 25 a	< 1.000	> 90 % in 2-3 Ländern	> 90 % in 2-3 Ländern
seltene Metalle	< 1.000.000	< 50 a	< 10.000	> 50 % in einem Land	> 50 % in 1 Land
häufigere Metalle	< 10.000.000	< 100 a	< 100.000	> 50 % in 2 Ländern	> 50 % in 2 Ländern
häufige Metalle	< 100.000.000	< 200 a	< 1.000.000	> 50 % in 3 Ländern	> 50 % in 3 Ländern
Massenmetalle	> 100.000.000	> 200 a	> 1.000.000		

Die Bedeutung dieser Kategorien richtet sich also nach den Kriterien, auf die sie sich beziehen. Das bedeutet: Die in Tab. 4-1 genannten Kategorien beziehen sich jeweils auf ein konkretes Kriterium (z.B. „selten in Hinsicht auf Reservenmenge“) und können daher kein zusammenfassendes Urteil einer allgemeinen „Seltenheit“ begründen. Für die Nutzung jedes der Kriterien gibt es verschiedene Argumente pro und contra, die im Folgenden tabellarisch aufgelistet sind (Tab. 4-2).

Tab. 4-2: Argumente pro und contra zu den Kriterien für die Auswahl der vertiefend zu untersuchenden seltenen Metalle.

Kriterien	Pro	Contra
Kriterium 1 – Reserven- menge	Daten zu Reserven weitgehend verfügbar (USGS), dadurch gute Vergleichbarkeit zwischen Metallen ²⁹ unmittelbarer Bezug zur abbautechnischen Verfügbarkeit	zeitliche Auflösung der Angaben eingeschränkt aufgrund ihrer kontinuierlichen Aktualisierung Reservenmenge hängt in hohem Masse vom Stand der Bergbauprospektion ab
Kriterium 2 – Statische Reichweite	Daten zu Reserven und Produktion (USGS) weitgehend verfügbar, dadurch gute Vergleichbarkeit zwischen Metallen ²⁹ anschauliche Bedeutung, dadurch leicht kommunizierbar (im Gegensatz zu anderen Reichweiten)	Genauigkeit der Angaben eingeschränkt; in hohem Masse vom Stand der Bergbauprospektion abhängig (vgl. Reservenmenge) Veränderungen von Angebot und Nachfrage werden nicht berücksichtigt. Bei Metallen mit großen relativen Veränderungen dadurch starke Über- oder Unterschätzung möglich. Veränderungen in der Wirtschaftlichkeit der Metallgewinnung infolge technischer Entwicklungen werden nicht berücksichtigt
Kriterium 3 – Produktions- menge	Daten zur Produktion weitgehend verfügbar (USGS), dadurch gute Vergleichbarkeit zwischen Metallen ²⁹	eingeschränkte Aussagefähigkeit in Bezug auf Verfügbarkeit, da ohne Relation zu den Reserven

²⁹ Ein weiterer wichtiger Aspekt ist der (weitgehend) freie Zugang zu diesen Daten, der voraussichtlich auch in Zukunft bestehen wird und ein Monitoring unterstützt.

Kriterien	Pro	Contra
Kriterium 4 – Rohstoffpreis	<p>direkter Vergleich zwischen Metallen möglich</p> <p>Einbezug der Nachfrage³⁰</p> <p>Einbezug des Kostenaufwands von Gewinnung und Aufbereitung³¹</p>	<p>aufgrund der verschiedenen Zeithorizonte der Nachfrageseite (Produktion vs. Geldanlage) keine unmittelbare Korrelation mit der Verfügbarkeit</p> <p>stark volatile Preise weisen darauf hin, dass sie teilweise stark Spekulationskäufen ausgesetzt sind (Futur-Handel)</p> <p>Tendenz zu Abbildung kurzzeitiger Perspektive, dadurch langfristige Entwicklung häufig nicht angemessen berücksichtigt</p> <p>erschwerter Datenverfügbarkeit, da viele Preise nicht über die Börse, sondern zwischen den Unternehmen ausgehandelt werden</p> <p>eingeschränkte Datenverfügbarkeit, da die historische Preisentwicklung nur für wenige Metalle hinreichend erfasst ist; zudem sind zahlreiche Metalle nicht börsennotiert</p>
Kriterium 5– Reserven-konzentration	<p>sinnvoll vor allem in Verbindung mit spezifischen umweltrelevanten Gewinnungsbedingungen</p> <p>bei hoher Reservenkonzentration ist das Risiko einer Einschränkung der Rohstoffversorgung erhöht</p>	<p>eingeschränkte Datenverfügbarkeit: nur für ca. 60% der untersuchten Metalle liegen (teilweise unzureichende) Daten vor</p> <p>im Normalfall irrelevant für die Verfügbarkeit; Relevanz abhängig von der Zusammensetzung der Förderländer</p>

³⁰ Je nach Fragestellung kann dies methodisch unerwünscht sein; hieran zeigt sich die Vermischung der Begriffe „Seltenheit“, die im Allgemeinen ohne die Nachfrage definierbar ist, und „Verfügbarkeit“, welche in Relation zur Nachfrage zu definieren ist.

³¹ Die „Seltenheit“ wird im Allgemeinen ohne Bezug zu den Gewinnungs- und Aufbereitungskosten definiert, hingegen hängt die Verfügbarkeit des Metalls von diesem Kostenaufwand ab (analog zu Fußnote 30).

Kriterien	Pro	Contra
Kriterium 6 – Produktionskonzentration	sinnvoll vor allem in Verbindung mit spezifischen umweltrelevanten Krisenfall Produktionsbedingungen bei hoher Produktionskonzentration ist das Risiko einer Einschränkung der Metallversorgung erhöht	eingeschränkte Datenverfügbarkeit: nur für ca. 60% der untersuchten Metalle liegen (teilweise unzureichende) Daten vor im Regelfall irrelevant hinsichtlich der Verfügbarkeit; Relevanz abhängig von der Zusammensetzung der Produktionsländer
Kriterium 7 – Feinverteilung von Metallen	Berücksichtigung der „Rezyklierbarkeit“ Beschreibung von Einzelaspekten der Rezyklierbarkeit wie Sammelbarkeit	eingeschränkte Datenlage: nur zu wenigen Metallen liegen weltweite Daten zum Einsatz vor

Für die Klassifizierung der Kriterien 1-7 ist generell festzuhalten, dass objektive Vorgaben zur Ziehung der Klassengrenzen nicht möglich sind. Die in Kap. 2.2 eingeführten Kategorien dienen lediglich der Strukturierung der Diskussion hinsichtlich der Eigenschaften der Metalle.

Auf Basis der Argumente zu den einzelnen Kriterien (Tab. 4-2) wurden „geringe statische Reichweite“ und „Feinverteilung von Metallen“ (Kriterien 2 und 7) als die Wesentlichen für die Fragestellung in Arbeitsschritt 2.1 ausgewählt³². Die Hauptgründe für den Verzicht auf die anderen fünf Kriterien sind wie folgt:

- Kriterien 1 und 3: Geringe Reserven und Produktion sind bereits durch die statische Reichweite (Kriterium 2) abgedeckt. Die Relation dieser beiden Größen ist aussagekräftiger hinsichtlich der Rohstoffverfügbarkeit als die einzelnen Größen. Gleichwohl ist zu betonen, dass die statische Reichweite keine Aussage erlaubt, ob bzw. wann eine Verknappung von Metallreserven zu erwarten ist.
- Kriterium 4: Der Metallpreis ist die relevante ökonomische Größe zur Abbildung von Angebot-Nachfrage-Relationen und in diesem Sinne auch von Knappheit. Der Metallpreis ist jedoch eine Momentaufnahme, die durch produktionsbedingte oder

³² Damit folgt das Vorgehen den Vorschlägen des Vorgängerdokuments (vgl. Fußnote 1), in dem die Kriterien 1, 2 und 7 mit Begründung vorgeschlagen wurden; hinsichtlich des Verzichts auf Kriterium 1 wird in den folgenden Zeilen eingegangen.

andere, teils spekulative Erwartungen zur Preisentwicklung beeinflusst wird. Der Umfang des Einflusses insbesondere der spekulativen Erwartungen ist jedoch zeitlich variabel und nicht einfach und deutlich zu ermitteln (und heraus zurechnen). Generell ist nicht zu erwarten, dass der Metallpreis die Aspekte der Seltenheit derart berücksichtigt, wie dies in diesem Projekt beabsichtigt ist.

- Kriterium 5 und 6: Eine hohe geographische Konzentration der Produktionsländer bzw. der Länder, in denen die Reserven liegen, beschreibt die Anfälligkeit der Beschaffung infolge kritischer marktwirtschaftlicher und national- oder wirtschaftspolitischer Entwicklungen. Dies ist ein Sonderfall der Gründe für Verknappung und soll in Phase I nicht weiter betrachtet werden. Aufgrund der politischen Bedeutung sind diese Kriterien von Relevanz für die Diskussion von internationalen Handlungsoptionen für eine Verbesserung und/oder Steuerung des weltweiten Ressourcenmanagements.

4.2 Kriterienauswahl zur Bestimmung der „Umweltrelevanz“

Zur Bestimmung der Umweltrelevanz wurden die Umweltkennzahlen (Indikatoren) KEA bzw. KRA sowie TMR als Vertreter für die Umweltrelevanz gewählt (vgl. Kap. 2.3.1), da sie als richtungssicher eingeschätzt werden für die mit der Gewinnung der Metalle verbundenen Umweltbelastungen. Als Betrachtungsebene wurden sowohl die „spezifische Umweltrelevanz“, als auch die „absolute Umweltrelevanz“ herangezogen. Damit wird einerseits auch die Bedeutung des potentiellen Wachstums der Umsatzmengen seltener Metalle berücksichtigt (bei hoher „spezifischer Umweltrelevanz“); andererseits wird der globalen Betrachtungsweise Rechnung getragen (durch Einbezug der „absoluten Umweltrelevanz“).

4.3 Auswahl der Metalle

Gemäß Kriterienauswahl zur Bestimmung der Seltenheit bzw. der Umweltrelevanz (Kap. 4.1, Kap. 4.2) wurden folgende Kriterien zur Auswahl der zu vertiefenden Metalle herangezogen:

- Statische Reichweite;
- Feinverteilung von Metallen;
- „Umweltrelevanz“ (jeweils absolut und relativ):
 - Globaler Materialaufwand (TMR);
 - Kumulierter Rohstoffaufwand (KRA);
 - Kumulierter Energieaufwand (KEA).

Die Auswahl der zehn zu vertiefenden Metalle erfolgte strukturiert diskursiv: Für jedes der Auswahlkriterien wurde jeweils eine Auswahlreihenfolge (engl.: *ranking*) für die Metalle bestimmt (Abb. 4-1).

Abb. 4-1: Darstellung der Auswahlkriterien für die Metalle (Darstellung nicht vollständig). Die Farben unterlegen die Bedeutung auf einer farbigen Ordinalskala (rot am bedeutendsten). Dissipative Verwendung (Feinverteilung): „ja“: dissipative Produktnutzung; „?“: dissipativ verwendet als Legierungsmetall; „ja?“: dissipative Produktnutzung vermutet; „(ja)“: dissipativ genutzt, begründet durch feine Verteilung von bzw. in Produkten; „+/-“: nicht feinverteilt, sogenannter „Grenzfall“. RUS: Russland; ZA: Südafrika.

Element	Ranking stat. RW	dissipative Verwendung	Ranking spez. TMR	Ranking spez. KRA	Ranking spez. KEA	Ranking abs. TMR	Ranking abs. KRA	Ranking abs. KEA
Antimon	4	ja	54			42		
Arsen	3	ja?	52	26	33	45	25	26
Chrom	11	?	56	25	17	12	6	2
Gallium	36	ja	15	14	13	48	29	29
Germanium		ja	8			33		
Mangan	18	?	57	28	29	17	11	7
Molybdän	20	?	30	15	23	18	8	18
Neodym	50	ja?	25			31		
Nickel	19	?	40	20	22	13	10	9
Strontium	1	ja	34			11		
Tantal	27	ja	22	13	12	34	18	21
Wolfram	15	ja	38	18	27	29	14	22
Zirkon	16	ja?	32			10		
Palladium		(ja)	2			15		
Palladium-RUS				11	9		22	17
Palladium-ZA				9	8		19	15
Platin	32	+/-	6			21		
Platingruppenmetalle	34	+/-						
Platin-RUS				8	6		16	13
Platin-ZA				4	4		13	12
Rhodium	37	ja	1			25		
Rhodium-RUS				5	2		24	
Rhodium-ZA				1	1		20	
Ruthenium	43	?	9	12	10	51	30	28

In einem ersten Schritt erfolgte die Vorauswahl nach den Kriterien statische Reichweite, relative Umweltrelevanz sowie absolute Umweltrelevanz. In einem zweiten Schritt wurde das Kriterium „Feinverteilung“ einbezogen, das bedeutet, Metalle ohne feine Verteilung wurden ausgeschlossen.

Darüberhinaus wurde eine stark anwachsende Nachfrage als Pro-Kriterium berücksichtigt, da dies mit dem Anstieg der „absoluten Umweltrelevanz“ einhergeht. Ferner wurde der Untersuchungsbedarf bei jenen Metallen erhöht eingeschätzt, welche bisher noch nicht oder nur wenig untersucht waren. Durch eine Zusammenschau der Gesamtheit der Kriterien wurde anschließend argumentativ die Auswahl festgelegt.

Im Folgenden werden die zehn zur vertiefenden Untersuchung ausgewählten Metalle vorgestellt und die Gründe für die Auswahl in Stichpunkten erläutert. Punktuell wird angegeben, warum sie anderen, nicht ausgewählten Metallen vorgezogen wurden.

Metallauswahl zur vertiefenden Untersuchung von Metallen mit Angabe der bedeutendsten Auswahlgründe:

Gallium	<ul style="list-style-type: none">• Feinverteilung (v.a. Halbleiter, Optoelektronik);• Produktion ausschließlich als Nebenprodukt;• sehr stark ansteigender Rohstoffbedarf erwartet (Photovoltaik, IC, WLED). <p>aufgrund seiner unkritischen statischen Reichweite und niedrigen absoluten Umweltrelevanz wäre Gallium nicht in die Metallauswahl gekommen</p>
Gold	<ul style="list-style-type: none">• hohe Umweltrelevanz: hoher relativer und absoluter KRA/KEA/TMR (Top10);• geringe statische Reichweite (Top 10);• teilweise fein verteilt.
Indium³³	<ul style="list-style-type: none">• geringe statische Reichweite (Top 10);• Einsatz in innovativen umwelttechnischen Anwendungen (LCD, LED/OLED, Prozessoren, <i>hand-held consumer electronics</i>), dadurch stark ansteigender Rohstoffbedarf erwartet (in Displays, Photovoltaik). <p>a) Es wurde eine signifikante Abweichung von TMR und KRA festgestellt, die weitere Untersuchungen nahelegen; b) Indium wurde als kritisches Metall eingestuft (NRC 2008).</p>

³³ Obwohl eines der „seltenen Metalle“, wurde Indium bereits in ersten Ansätzen in Projekten außerhalb des MaRess-Projektes untersucht, da nach aktuellem Wissensstand von geringen Reserven auszugehen ist.

Mangan

- hohe Umweltrelevanz: hoher absoluter KEA (Top 10);
- geringe statische Reichweite (Top 20);
- Feinverteilung: Hauptlegierungselement in Kohlenstoffstählen;
- gegenüber Chrom und Nickel wird Mangan bei der Stahlherstellung abgeschieden, dadurch hohe Recyclingverluste;
- künftig Gewinnung denkbar aus Tiefsee-Lagerstätten.

a) Mangan und Nickel bzw. Chrom unterscheiden sich in Bezug auf ihr Schmelzverhalten bei der Stahlherstellung derart, dass Nickel und Chrom in größerem Maße in der Schmelze verbleiben. Aufgrund der großen Bedeutung der Legierungsmetalle sollten bei der Auswahl beide Schmelzeigenschaften (und damit Verfahrenspfade) einander ergänzend betrachtet werden; b) Mangan wird gegenüber Molybdän aufgrund seiner leicht höheren Umweltrelevanz bevorzugt (höherer TMR- und KEA-Wert). c) Mangan wurde als kritisches Metall eingestuft (NRC 2008).

Nickel

- hohe Umweltrelevanz: hoher absoluter KRA/KEA (Top10), absoluter TMR (Top 20);
- geringe statische Reichweite (Top 20);
- Feinverteilung: Legierungselement in rostfreien Stählen, daneben relativ hoher Anteil an Nicht-Stahl-Verwendungen;
- zunehmende technische Bedeutung absehbar aufgrund erhöhten Bedarfs an hochwertigen rostfreien Stählen; gleichzeitig zunehmende Verunreinigung durch mangelhafte Rezyklierungssysteme auf globalem Maßstab.

Nickel und Chrom weisen ähnliche statische Reichweite und Umweltrelevanz auf. Auch ihr Abtrennverhalten bei der Stahlherstellung ähnelt einander. Nickel wird bei der Metallauswahl gegenüber Chrom trotz der niedrigeren Umweltrelevanz bevorzugt, da von einer besseren Datenlage auszugehen ist³⁴.

Palladium

- hohe Umweltrelevanz: hoher relativer KRA/KEA/TMR (Top 10);
- Stellvertreter für PGM.

statische Reichweite unkritisch; Bevorzugung gegenüber Rhodium aufgrund größerer Einsatzmenge, gegenüber Platin wegen paralleler Untersuchung von Platin in Arbeitsschritt AS 2.2.

³⁴ Zu Nickel liegen Arbeiten des STAF-Projekts der *Yale University* vor.

Silber	<ul style="list-style-type: none"> • hohe Umweltrelevanz: hoher KRA (absolut, relativ) (Top 10), mittlere TMR und KEA (absolut, relativ); • sehr geringe statische Reichweite (< 20a) (Top 10); • teilweise fein verteilt; • auffallend vielfältiger Einsatz in den Bereichen EuE, Medizin und Nanotechnologie (vgl. Kap. 3); • Einsatz in innovativen Anwendungen, auch in der Umwelttechnik (<i>advanced electromotor generator</i>, Solarzellen, Energieübertragung, Hochleistungsspiegel, Abgasreinigung, <i>hand-held consumer electronics</i>). <p>Silber und Gold unterliegen als Edelmetalle ähnlicher Mechanismen der Feinverteilung. Da Silber jedoch in einer Vielzahl innovativer Anwendungen bzw. in der Umwelttechnik benötigt wird, wird es bei der Metallauswahl bevorzugt.</p> <p>Die vorliegenden Daten zeigen höhere KRA-Werte als TMR-Werte, was auf Fehlberechnungen oder signifikante Unsicherheiten der Werte hinweist.</p>
Titan	<ul style="list-style-type: none"> • hohe Umweltrelevanz: hoher absoluter KRA/KEA/TMR (Top10), mittlere relative KRA/KEA/TMR; • fein verteilt, dissipative Produktnutzung in Farben bzw. Lacken. <p>statische Reichweite unkritisch</p>
Zink	<ul style="list-style-type: none"> • hohe Umweltrelevanz: hoher absoluter KEA (Top 10), hoher absoluter TMR/KRA (Top20); • sehr geringe statische Reichweite (Top 10); • fein verteilt; • Einsatz in innovativen umwelttechnischen Anwendungen (Akkumulatoren).
Zinn	<ul style="list-style-type: none"> • hohe Umweltrelevanz: hoher absoluter TMR/KRA (Top10), hoher absoluter KEA (Top 20); • sehr geringe statische Reichweite (Top 10); • fein verteilt.

5 Vertiefende Untersuchungen ausgewählter Metalle

5.1 Ziel der Untersuchungen

Das Hauptziel der vertiefenden Untersuchung ist einerseits, sich einen analytischen Überblick zu verschaffen, andererseits für die ausgewählten Metalle eine konsistente Übersicht über Umweltaspekte zu gewinnen, die sich im Wesentlichen in folgende zwei Bereiche gliedern lassen:

- metallspezifische Umweltbelastungen über den Lebenszyklus. Dies umfasst Wasser- und Luftemissionen sowie den Einsatz von belastenden Chemikalien etc.;
- metallspezifische Materialverluste über den Lebenszyklus.

Vorarbeiten aus früheren Projekten, die als Grundlage genutzt werden könnten, fehlen weitgehend bzw. sind sehr unterschiedlich entwickelt. Häufig existieren hinsichtlich der Beschreibung der Metallkreisläufe punktuell Informationen, die aufgrund der unterschiedlichen Bezugnahme in Raum und Zeit jedoch nicht miteinander in Einklang zu bringen sind. Ergebnisse von Arbeiten mit gleichem Ziel sind bislang kaum bekannt (abgesehen von einigen wenige Stoffflussanalysen mit Focus auf Gesamtverständnis der Massenströme statt auf Verluste).

Nicht alle Materialverluste in den Metallflusssystemen sind bei gegebenen Technologien vermeidbar. Einige Anwendungen sind bei unverändertem Einsatz praktisch unvermeidbar mit Materialverlusten verbunden, teils aus Gründen der Verfahrenstechnik, aufgrund dissipativer Nutzung oder aus anderen Gründen. Wo möglich sollen die Minderungspotenziale der Verluste angezeigt werden.

5.2 Methode

Die Metalluntersuchungen dienen einer Einschätzung der Umweltbelastungen und Materialverluste hinsichtlich des gesamten Lebenszyklus, das bedeutet vom Erzabbau über die Aufbereitung und Produktion zur Nutzung, dem Recycling und der Ablagerung. Prinzipiell sind alle Umweltaspekte bzw. alle Materialverluste einbezogen, welche entlang des Lebenszyklus auftreten; allerdings möchten und können die Metalluntersuchungen hier kein vollständiges Nachschlagewerk bieten, das sämtliche Umweltaspekte im untersuchten System einbezieht, da dies den Rahmen dieser Arbeiten sprengen würde und der Klarheit abträglich wäre. Vielmehr sind die relevanten Umweltaspekte zielorientiert aufzuspüren und kompakt darzustellen, weniger relevante dienen der Erläuterung des Kontextes. Die diesem Prozess zugrundeliegende Bewertung der Umweltaspekte ist nicht formalisiert und erfolgte auf

Basis des Expertenwissens der Autoren und einer gezielten Literaturrecherche und -auswertung der deutsch- und englischsprachigen Fachliteratur. Sie sind daher keinesfalls als abschließend anzusehen.

Bei den Untersuchungen handelt es sich im Kern um vereinfachte Stoffflussanalysen (SFA); sie folgen den methodischen Anforderungen so weit wie möglich. Aufgrund der meist sehr eingeschränkten Datenlage wurden entgegen den methodischen Anforderungen der SFA wo erforderlich Abstriche in Kauf genommen. Es wurde ein iteratives, zielorientiertes Vorgehen gewählt, um die metallspezifischen „hot spots“ zu identifizieren. So war beispielsweise bei der Bilanzierung in der Regel der Einbezug mehrerer Bezugsjahre erforderlich, um ein lebenszyklusweites Gesamtbild zu erhalten.

Die ausgeprägte Streuung der Qualität der Informationslage zu den Metallen erschwerte den Gesamtüberblick³⁵. Die Untersuchung des Stoffhaushalts über den gesamten Lebenszyklus erfolgte daher für jedes der zehn Metalle nach dem gleichen Schema, um die Vergleichbarkeit zwischen den Metallen zu erhöhen (Abbildung 5.1). Für jeden Prozess des Systems wurden über den Lebenszyklus zum einen die relevanten Metallverluste³⁶ und zum anderen relevante spezifische Umweltbelastungen bestimmt³⁷ (vgl. Kap. 5.2.1). Das vereinheitlichende Schema besteht aus zwei Elementen:

- ein metallübergreifendes globales Stoffflusssystem, das die Stoffflüsse jedes der untersuchten Metalle darstellen lässt (Abbildung 5.1), das sogenannte Referenz-System. Es wurde mithilfe der Daten aus den Untersuchungen eine vereinfachte Stoffflussanalyse durchgeführt. Das Stoffflusssystem besteht aus Prozessen und Flüssen (hier: Metallflüsse), die die Prozesse verbinden. Bei der Gewinnung und Nutzung sind Lager vorgesehen (sofern hierfür Daten verfügbar sind).
- eine inhaltliche Struktur, die dem im Stoffflusssystem dargestellten Lebenszyklus folgt. Im Bericht spiegelt sich dies in den entsprechenden Kapiteln wieder (Kap. 5.2.2).

³⁵ Es ist zu betonen, dass die Informationslage für die verschiedenen Metalle sehr unterschiedlich ist. Basismetalle wie Nickel sind naturgemäß ausführlicher beschrieben und diskutiert als sehr seltene Metalle wie Indium oder Gallium. Die Datenlage ist daher für sehr seltene Metalle auf weniger Quellen gestützt und dementsprechend unsicherer.

³⁶ Unter Verlusten wird dabei verstanden, dass ein Metall aus der gewünschten Prozesskette z.B. in die Entsorgung geht, von wo es nicht zurück gewonnen wird.

³⁷ Eine vollständige Beschreibung sämtlicher Umweltbelastungen konnte im Rahmen dieser Untersuchung aufgrund der vielfältigen Prozesse bei der Herstellung und der Nutzung der Metalle nicht erfolgen.

Stoffflussanalyse

Für jedes Metall werden die Untersuchungsergebnisse zu den Metallflüssen zwischen den Prozessen sowie die Materialverluste im jeweiligen Stoffflusssystem zusammengefasst. Die Stoffflusssysteme sammeln die Ergebnisse und zeigen ggf. Diskrepanzen auf; im Gegensatz zu expliziten Stoffflussanalysen wurden die Prozesse hier nicht durchgehend bilanziert. Hierfür fehlte in der Regel die Datengrundlage, da die Systeme teilweise abstrahiert und nicht alle Daten für diesen Zweck erhoben bzw. überprüft werden konnten.

Die Stoffflussanalyse umfasst von der Gewinnung über die Aufbereitung, Verarbeitung und Produktion sowohl die Prozesskette der Primär-, als auch der Sekundärproduktion. Darüber hinaus werden die Prozesse Nutzung und Recycling (plus Downcycling) dargestellt sowie als Senken die Deponien bzw. andere Senken/Umwelt.

Zur Analyse der Materialverluste wurden Recherchen bezüglich der einzelnen Prozesse (d.h. Phasen der Lebenszyklen) der Metalle durchgeführt, die aufzeigen, in welchem Prozess die Verluste auftreten und wie groß sie sind (Quantität). Soweit möglich wird auch die Form des Einsatzes bzw. Verlustes ermittelt (Qualität). Nicht inbegriffen sind die Auswirkungen der Metallverluste.

Die Untersuchungen basieren auf Literaturrecherchen zu den Metallen. Hierzu wurden primär Fachpublikationen (Fachzeitschriftenartikel, Buchartikel, Nachschlagewerke) herangezogen, doch um Datenlücken zu füllen wurden zusätzlich Zeitungsartikel, Firmenwebseiten und andere Informationsquellen genutzt. Ergänzend wurden persönlich Informationen von Experten via Telefon und Email eingeholt.

Bei diesem Vorgehen wurden die Ergebnisse aus Kap. 3 und Kap. 10.2 genutzt, beispielsweise die metallspezifischen Vorüberlegungen zu dissipativer Verwendung gibt Hinweise, ob ein Recycling überhaupt technisch möglich ist (vgl. Kap. 10.2). Ebenso wurde auf die bestehenden Umweltprofile zurückgegriffen, die Informationen zur Umweltbelastung der Prozesse Gewinnung, Aufbereitung und Verarbeitung beinhalten

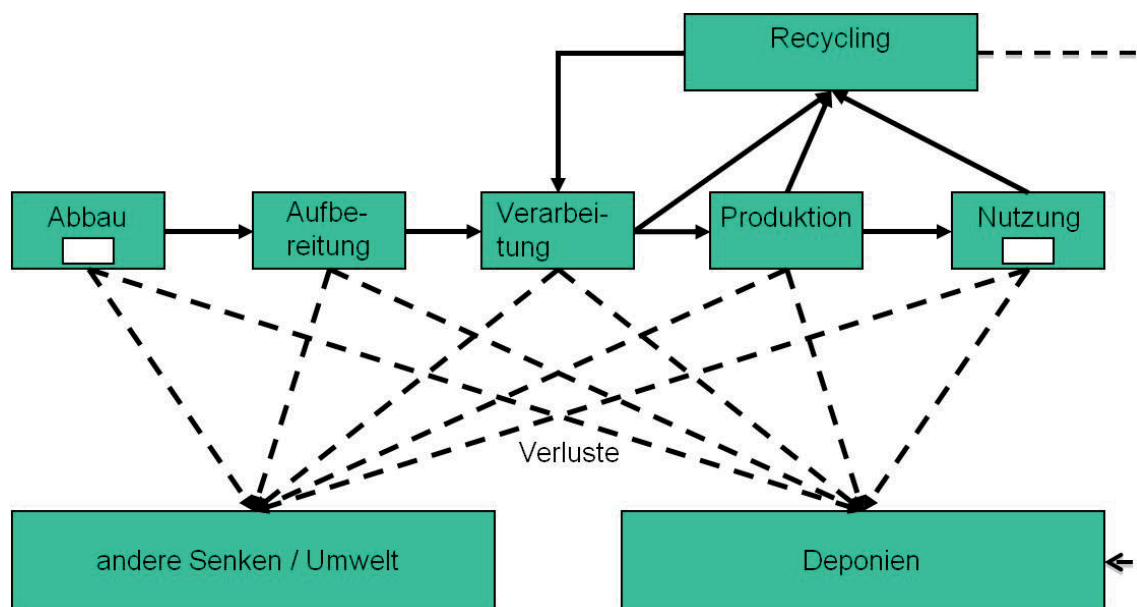
5.2.1 Systemdefinition: Umfang und Auflösung der Untersuchungen

Die Systemgrenze der Stoffflussanalyse liegt zwischen Technosphäre und Umwelt. Der geographische Bezug der Untersuchung ist die Welt. Zeitlich beziehen sich die Angaben auf das neueste verfügbare Jahr (in der Regel 2008), doch musste teilweise auf ältere Daten zurückgegriffen werden.

Aufgrund des Umfangs der Aufgabe und der eingeschränkten Datenverfügbarkeit steht nicht im Vordergrund, alle auftretenden, sondern die als bedeutend erachteten Umweltbelastungen darzustellen. Hierzu wurde fallweise auf die wichtigsten Einsatzbereiche des jeweiligen Metalls fokussiert – bezogen auf die Menge eingesetzten Metalls.

Bei den Materialverlusten wird neben den Mengen auch deren Qualität behandelt, indem die Form des Einsatzes (z.B. dissipativ) beschrieben wird. Eine Beschreibung der entsprechenden Umweltauswirkungen der Verluste ist nicht Gegenstand der Untersuchungen.

Abb. 5.1: Referenz-Metallsystem zur Darstellung der Metallkreisläufe und ihrer Verluste. Die unerwünschten Metallflüsse (Verluste) sind gestrichelt dargestellt. Die weißen Kästen sind Lager (stocks) des entsprechenden Metalls.



5.2.2 Struktur der Untersuchungen

Die Metalluntersuchungen folgen der gemeinsamen Struktur, welche in Kap. 5.2.1 durch die Systemdefinition vorgegeben ist. Dadurch ist Struktur der Untersuchungen zu den zehn Metallen soweit als möglich vereinheitlicht, um die Vergleichbarkeit der Ergebnisse zu erhöhen. Die Abfolge der Prozesse in den metallspezifischen Berichten verläuft entlang dem „Lebenszyklus“ des Metalls (vgl. Kap. 0 in Teil 2: Vorbemerkungen).

Die Prozesse lassen sich wie folgt voneinander abgrenzen (Me steht als Platzhalter für die Metalle):

Abbau: Der Abbau umfasst die Entnahme der Rohstoffe und die Trennung des Erzes vom tauben Gestein.

Aufbereitung: Durch Aufbereitung der Erze erhält man i. d. R. Metallerzkonzentrate (teilweise werden diese nicht Konzentrate genannt sondern weisen einen Me-spezifischen Namen auf). Diese sind der Ausgangsstoff für die anschließende Verarbeitung. Die Aufbereitung umfasst die Prozesse Reinigung, Zerkleinerung, Aufschluss der Erze (Waschen, Brechen, Mahlen, Sortieren, Flotieren, Chemischer Aufschluss etc.).

Verarbeitung: Die Verarbeitung ist ein Sammelbegriff für die metallurgische Verhüttung, das Schmelzen und die Raffination/Veredelung. Je nach Lebenszyklus werden diese Teilprozesse separat dargestellt oder zusammengefasst. Bei der Verarbeitung werden die Metallerzkonzentrate durch pyro- oder hydrometallurgische Verfahren zum eigentlichen Metall (metallische Form) bzw. zu Halbzeug verarbeitet.

Produktion: Produktion umfasst jene Arbeitsschritte, die das Metall erfährt, bevor es in eine nutzbare Form überführt wird. Je nach Profil der Me-Nutzung zählt dazu die Umformung zu Endprodukten, z.B. Drähten und Blechen, oder auch die Produktion von komplexen Gütern (z.B. Computer).

Nutzung: Die Nutzung beschreibt die Phase, in der das Metall dem Endverbrauch zur Verfügung steht. Dies schließt die Lagerung im Einzelhandel mit ein, ebenso das *hibernating* von Gütern, die nicht mehr genutzt werden, doch noch nicht dem Abfallsystem zugeführt wurden.

Recycling: Das Recycling umfasst die Sammlung, Zerlegung und die Rückgewinnung von Gütern nach der Nutzung (Me-führende Abfälle/Altschrotte) oder auch Rückständen aus der Verarbeitung/Produktion (Neuschrotte).

N.B.: Abfälle, die kein Metall führen oder nicht einer gezielten stofflichen Verwertung zugeführt werden, werden als direkter Fluss aus der Nutzung in die Deponien dargestellt. Beispielsweise werden Batterien, die als Batteriefraction gesammelt werden, zum Prozess „Recycling“ geführt; hingegen werden Batterien, die lediglich als Restmüll gesammelt werden (und damit diese Batterien einer weiteren Aufbereitung entziehen) direkt zum Prozess „Deponien“ geführt.

Metalle in die Deponien: Im Prozess „Metalle in die Deponien“ werden sämtliche metallführende Abfälle gesammelt, unabhängig ob sie aus der Nutzung (direkt) stammen oder als Rückstand des Recyclings oder der Verarbeitung/Produktion.

Metalle in andere Senken / Umwelt: Dieser Prozess sammelt sämtliche Me-Flüsse in die Umweltkompartimente. Zusätzlich werden dissipative Produktnutzung oder andere unbeabsichtigte Me-Flüsse in andere Stoffsysteme (*downcycling*) hier zusammengefasst. Beispielsweise werden manganführende Stähle überwiegend „als Stahl rezykliert“, wodurch das Mangan durch Verdünnung seine Funktionalität dauerhaft verliert. Es gelangt damit in „andere Senken“.

Die relativ einfache Definition der Prozesse erlaubt, die teils sehr unterschiedlichen, metallspezifischen Prozesse in den jeweiligen Metallsystemen dem Referenz-Metallsystem (Abb. 5-1) zuzuordnen.

5.2.3 Gegenstand der Untersuchungen

Die Untersuchungen fokussierten auf die direkten Umweltbelastungen; indirekte, die durch den Energieverbrauch in den Prozessen erzeugt wurden (z. B. für die Raffination), standen nicht im Fokus der Arbeit³⁸. Daher wurden energiebedingte Umweltbelastungen grundsätzlich nicht systematisch einbezogen, wobei diese in bestimmten Fällen (bei hohen Werten für TMR, CO₂-Äq. etc.) mitgeführt wurden.

Die Untersuchungen basieren auf der Auswertung der metallspezifischen Fachliteratur, die die beiden Themenbereiche Umweltbelastungen und Materialverluste beleuchtet.

³⁸ Häufig spielen die energiebedingten Umweltbelastungen bei der Umweltbilanz von Metallen eine wichtige Rolle; diese Umweltbelastungen können jedoch in der Regel in hohem Maß durch eine Veränderung des Energie-Mix beeinflusst werden.. Ziel dieser Untersuchung war es nicht, diesen Umstand zu bestätigen und zu quantifizieren, sondern weitere relevante Umweltbelastungen zu bestimmen.

5.3 Ergebnisse

Die Ergebnisse der zehn Metalluntersuchungen sind in zehn eigenständigen Modulen dargestellt (Kapitel I bis X) (Tab. 5-1). Aufgrund ihres Umfangs finden sie sich daher als metallspezifische Untersuchungsberichte in einem separaten Teil des Berichts (Teil 2).

Tab. 5-1: Überblick der zehn Metalluntersuchungen: Metall und Symbol

Metall	Symbol
I. Gallium	Ga
II. Gold	Au
III. Indium	In
IV. Mangan	Mn
V. Nickel	Ni
VI. Palladium	Pd
VII. Silber	Ag
VIII. Titan	Ti
IX. Zink	Zn
X. Zinn	Sn

5.4 Übersicht zu Umweltbelastungen und Materialverluste der zehn Metalle

In einer Matrix wurden die Ergebnisse zu den Materialverlusten und den Umweltbelastungen synoptisch für die zehn Metalle zusammengefasst, geordnet nach Metall und Prozess (Phase des Lebenszyklus). Diese Matrix liefert damit eine tabellarische Übersicht über die Lokalisierung der Herausforderungen. Es wurde eine Bewertung der Umweltbelastung und der Materialverluste jeweils auf Ordinalniveau vorgenommen, welche per Farbschema dargestellt ist. Bei den Materialverlusten erfolgte die Bewertung entsprechend einer prozentualen Klassierung der Materialverluste. Die Matrizen sind auf den beiden folgenden Seiten dargestellt.

MaRes AS2.1 - Matrix zu den Umweltbelastungen der einzelnen Metalle

	Gewinnung	Aufbereitung	Verarbeitung	Produktion	Produktion von spezifischen Produkten	Nutzung	Recycling	Downcycling	Deponien	andere Senken / Umwelt
Ag	generell: Landschaftsveränderungen durch Flächeninanspruchnahme sulfidische Erze: Grundwasserbelastung (AMD)	Silbererz: Belastung von Abwasser und Luft mit Natrumsulfid möglich Bleierz: Bleistaub Kupfererz: Abwasserbelastung mit Schwefelsäure, SO ₂ - und NO _x -Emissionen	CO-Emissionen möglich	Fotografie-Produkte: Belastung von Abwasser bzw. Klärschlamm		Fotografie: Belastung durch nicht sachgerecht entsorgte Fotochemikalien möglich	siehe Aufbereitung	keine Angaben	keine Angaben	keine Angaben
Au	generell: Landschaftsveränderungen durch Flächeninanspruchnahme Gediegenes Gold: Emissionen von Schwermetallen in Wasser, Sprenggas Sylvanit / Calaverit: Sprenggas	Amalgammethode: Quecksilberemissionen in Luft Cyanidlaugung: Emissionen von Cyaniden in aquatische Systeme möglich Carbon-Pulp-Prozess: Emission von Laugen möglich Miller-Verfahren:	unbekannt	unbekannt	unbekannt	unbekannt	Schmuck: Keine relevanten Belastungen Elektro- und Elektronikgeräte: Je nach Recyclingtechnik div. Emissionen (777) Dentalmedizin: keine Angaben Diverse Anwendungsbereiche: vgl. Herstellung	keine Angaben	keine Angaben	keine Angaben
Ga	nicht relevant	Wasserbelastungen durch Gallium, verunreinigte Säuren, Komplexbildner (Kohlenwasserstoffe); Quecksilberemissionen in Luft keine quantitativen Angaben	Sulfatation: Wasserbelastung durch Säureabtrag; Luftbelastung durch Lösungsmittel keine quantitativen Angaben	Halbleiterprod.: Luftbelastung durch Aromenwasserstoff (unwahrscheinlich) sowie Gallium- und Arsenstaub	-	keine Angaben	Aufschluss: Wasserbelastung durch Salzsäure (10 l HCl konz./kg GaAs Abfall); H ₂ O ₂ 30% (10 l/kg GaAs Abfall); Luftbelastung durch Aromenwasserstoff möglich Extraktion: Wasserbelastung durch Salzsäure (10 l HCl konz./kg GaAs Abfall)	keine Angaben	Wasserbelastung durch Gallium (fischgefährdend)	keine Angaben
In	nicht relevant	Rösten Zn-Produktionsrückstände: SO ₂ -Emissionen (bei saftig Erze) Säureextraktion von Zn/Rückständen: Schwefelsäure, VOC, org. Lösungsmittel Ausfällen: NaHSO ₄ Basen-Extraktion: NaOH (konz.) SM-Abtrennung: H ₂ S, Belastung durch Cd, As, Ti und Ammoniumsulfat elektrolyt. Raffination: Chloriden-Emissionen Festbottelenaustauschverfahren: Ammoniak in Abwasser Ionen-tauscher mit Flüssig-Flüssig-Extraktion: org. Lösungsmittel in Abwasser	Jarosit-Prozess: Emissionen unklar	keine Angaben	keine Angaben	keine Angaben	ITO-Sputter-Targets: keine bekannt	keine Angaben	unbekannt	keine Angaben
Mn	THG: 12 kg CO ₂ -Äq./t Mn Versauerung: 0,25 kg SO ₂ -Äq./t Terrestrische Eutrophierung: 0,042 kgPO ₄ -Äq./t KBA: 4,35 t/t Flächenverbrauch: 0,172 m ² /t			THG: 2.490 kg CO ₂ -Äq./t Mn Versauerung: 15,8 kg SO ₂ -Äq./t Terrestr. Eutrophierung: 1,80 kg PO ₄ -Äq./t KBA: 5,94 t/t Flächenverbrauch: 0,49 m ² /t		keine Angaben	keine Angaben	keine Angaben	keine Angaben	keine Angaben
Ni	Sulfidische Erze: Sprenggas (0,077 kg Sprengstoff / t kg Ni) Dieselabgas (0,2 l Diesel / t kg Ni) CO ₂ , ca. 0,56 kg/kg (inkl. Dieselabgas) Abwasser, Abraum, AMD Laterite: Dieselabgas (0,2 l Diesel / t kg Ni) Sprenggas (sehr selten) Grubenwasser, Flächeninanspruchnahme, Abraum (50-300 % der Erzmenge) Durchschnittliche Weltproduktion: Abraum und Berge 32 kg / kg Ni davon nicht genutzte Berge 16 kg / kg Ni Abgas ca. 0,56 kg CO ₂ / kg Ni KBA: 1,7 t/t Ni	Sulfidische Erze: Aufbereitungsberge Flächeninanspruchnahme AMD bei Eisensulfiden Wasserverschmutzung durch gelöste Schwermetalle, Säuren, Thioester, Schwefelwasserstoff, Flotationen (0,039 kg / kg Ni) Laterite: keine Angaben Durchschnittliche Weltproduktion: Aufbereitungsberge 46 kg / kg Ni davon nicht genutzte Berge 29,4 kg / kg Ni	Verhüttung sulfidischer Erze: CO ₂ ca. 3,3 kg/kg Ni, Anodenschlamm 0,11 kg/kg Ni Schwefelsäure (konz.) 8,3 kg/kg (ggf. SO ₂ -Emissionen) Laugereisrückstände 0,03 kg/kg, Flugstaub 0,28 kg/kg Verhüttung der Laterite: CO ₂ ca. 29 kg/kg, Laugereisrückstände 9,65 kg/kg Ni Flugstaub 1,05 kg/kg Ni Durchschnittliche Weltproduktion: CO ₂ 16 kg/kg Ni, Schwefelsäure 4,4 kg/kg Ni Laugereisrückstände 4,5 kg/kg Ni, Flugstaub 0,7 kg/kg Ni	Raffination: unbekannt Produktion von Nickel 99,5%: THG-Emissionen 11,2 kg/kg Ni KEA 194 MJ/kg Ni	Rückgewinnung von Neuschrotten keine Angaben	keine Angaben	plus Schrott-handel keine Angaben	keine Angaben	keine Angaben	keine Angaben
Pd	Landschaftsveränderung durch Flächeninanspruchnahme Gesamte Extraktion: 23 Mio. t extrahiertes Gestein	SO ₂ -Äq. 1.545 t/t Pd 360.000 t SO ₂ -Äq.	keine Umweltbelastungen	keine Angaben	keine Angaben	keine Angaben	keine Angaben	keine Angaben	keine relevanten Umweltbelastungen durch Pd	keine Angaben
Sn	THG: 9.450 kg CO ₂ -Äq./t Sn (777) Versauerung: 259 kg SO ₂ -Äq./t Sn Terrestrische Eutrophierung: 12 kgPO ₄ -Äq./t Sn Kumulierter Rohstoffaufwand: 707 t/t Sn Flächenverbrauch: 71 m ² /t			THG: 7.273 kg CO ₂ -Äq./t Sn Versauerung: 161 kg SO ₂ -Äq./t Sn Terrestrische Eutrophierung: 8,8 kgPO ₄ -Äq./t Sn KBA: 17 t/t Sn Flächenverbrauch: 47 m ² /t		keine Angaben	PVC-Stabilisator: Diffuser Abtrag, Innenraumluft/Staub, toxische Belastung Bladd: Toxische Wirkung in aquatischer Umwelt	keine Angaben	keine relevanten Umweltbelastungen	i.All. Rückläufig, doch keine spezifischen Angaben
Ti	generell: Landschaftsveränderungen durch Flächeninanspruchnahme (Extraktion, Abfälle) Titaneit: Luftbelastung durch Sprenggas, Grundwasserbelastung Rutil: Störung von Oberflächengewässern Seifen: siehe Landschaftsveränderungen keine quantitativen Angaben	Chlorierung, Wasserbelastung durch Flotationen und Schwefelsäure, Luftbelastung durch Chlor keine quantitativen Angaben	Reduktion, Raffination, Umschmelzen: keine quantitativen Angaben	bei spanender Bearbeitung: Wasserbelastung durch Kühlschmiermittel keine quantitativen Angaben	keine Angaben	keine Angaben	keine Angaben	keine Angaben	keine relevanten Umweltbelastungen	keine relevanten Umweltbelastungen
Zn	Sulfidische Erze: Sprenggas (0,077 kg Sprengstoff / t kg Ni) Dieselabgas (0,2 l Diesel / t kg Ni) CO ₂ , ca. 0,56 kg/kg (inkl. Dieselabgas), Abwasser, Abraum, AMD Laterite: Dieselabgas (0,2 l Diesel / t kg Ni) Sprenggas (sehr selten), Grubenwasser			THG: 2.834 kg CO ₂ -Äq./t Versauerung: 165,5 kg SO ₂ -Äq./t Terrestrische Eutrophierung: 1,8 kg PO ₄ -Äq./t KBA: 17,75 t/t Flächenverbrauch: 0,69 m ² /t		keine Angaben	keine Angaben	keine Angaben	keine Angaben	keine Angaben

Legende: Verteilung der Environmental Pressures entlang des Lebenszyklus per Metall, nach Einschätzung der Bearbeiter

hochrelevante Umweltbelastungen
relevante Umweltbelastungen
mäßig relevante Umweltbelastungen
mäßig-gering relevante Umweltbelastungen
geringrelevante Umweltbelastungen
Umweltbelastungen nicht von Relevanz

Im Folgenden werden für jedes Metall ausgewählte Ergebnisse dargestellt; zuerst bezogen auf die Umweltbelastungen, dann auf die Materialverluste.

5.4.1 Gallium

Umweltbelastungen

Bei der Gewinnung von Gallium fallen keine relevanten spezifischen Umweltbelastungen an. Gallium wird als Nebenprodukt bei der Aluminiumoxidproduktion gewonnen und ist dabei von ökonomisch untergeordneter Bedeutung, so dass damit verbundene Umweltbelastungen konventionsgemäß weitgehend dem Hauptprodukt zugerechnet werden. Bei der Aufbereitung und der Raffination können Gallium, verunreinigte Säuren sowie ggf. Komplexbildner in aquatische Systeme freigesetzt werden, daneben Luftverschmutzung durch Quecksilberdämpfe sowie Lösungsmittel. Während der Produktion von galliumhaltigen Halbleitern kann Gallium- und Arsenstaub freigesetzt werden. Beim Recycling kann eine Belastung aquatischer Systeme durch Salzsäure und Luftverschmutzung durch Arsenwasserstoff auftreten.

In Deponien kann die Ausschwemmung von Gallium Fischbestände gefährden (eine Einschätzung der Belastung auf Basis der derzeit verfügbaren Informationen ist nicht möglich).

Materialverluste

Zu Gallium konnten in dieser Studie keine ausreichenden Angaben zu Metallverlusten ermittelt werden.

5.4.2 Gold

Umweltbelastungen

Die bedeutendsten Umweltbelastungen wurden in der Gewinnung und Aufbereitung festgestellt. Bei der Primärproduktion bedingen die großen Gesamtextraktionsmengen³⁹ (ca. 1.400 Mio. Tonnen) sehr starke Eingriffe in die jeweilige Landschaft. Darüberhinaus treten bei der Gewinnung Emissionen von Schwermetallen auf. Verschiedene Aufbereitungspfade können verschiedene umweltbelastende Emissionen

³⁹ Die „Gesamtextraktion“ wurde als Produkt des TMR und der Produktionsmenge des Metalls errechnet. Die in Kap. 5.4 aufgeführten Angaben zu Gesamtextraktionen basieren für alle Metalle auf Basis der globalen Produktionsmengen von 2007.

in aquatische Systeme bedingen, so Quecksilber bei der Amalgammethode, Cyanid bei der Cyanidlaugung, sowie Säuren oder Laugen. Desweiteren werden bei der Goldrückgewinnung von EE-Schrotten technologieabhängige Emissionen erwartet.

Materialverluste

Die jährlichen Gesamtverluste von Gold werden zu ca. 800 t/a abgeschätzt (ca. 30% der Fördermenge). Erhebliche Verluste entstehen bei der Gewinnung, wo ca. 230 t/a (30 %) über den Abraum verloren gehen. Die bedeutendsten Verluste treten beim Rezyklieren von Elektro-Altgeräten auf, sowohl durch Sammelverluste (30 %), als auch durch Verluste bei der technischen Rückgewinnung. Die Unsicherheiten der Verluste sind hier ausgesprochen groß und sollten näher untersucht werden. Zudem geht durch mangelhaftes Recycling auch Gold in diversen anderen Produkten (inkl. der Dentalmedizin) verloren. Relevant ist ausserdem der Goldverlust bei der Schmuckproduktion, der auf 100 t/a geschätzt wird.

5.4.3 Indium

Umweltbelastungen

Da Indium als Nebenprodukt gewonnen wird – überwiegend bei der Zinkproduktion – fallen bei seiner Gewinnung keine relevanten spezifischen Umweltbelastungen an (bzw. werden diese konventionsgemäß dem Hauptprodukt zugerechnet). Die Aufbereitung ist aufwendig und erfordert eine umfangreiche Reihe von Chemikalien, beispielsweise Schwefelsäure, Natriumhydrogensulfit, Natriumhydroxid, Schwefelwasserstoff, VOC, organische Lösungsmittel und Chlorgas, die bei unsachgemäßem Einsatz oder Störfällen potenziell die Umwelt belasten können. Beim Rösten sulfidischer Erze treten zusätzlich Schwefeldioxid-Emissionen auf. Außerhalb der Aufbereitung sind keine relevanten Umweltbelastungen bekannt.

Materialverluste

Die Indiumverluste sind nicht ausreichend bekannt. Der Anteil, der bei der Aufbereitung der indiumführenden Zinkerze bei der Zinkproduktion verlorengelht (also vor der Indiumgewinnung) umfasst ca. 500-700 t/a. Daneben gehen auch indiumführende Neuschrotte verloren, da global (!) noch kein entsprechendes Angebot für ein Recycling besteht.

5.4.4 Mangan

Umweltbelastungen

Die bekannten Umweltbelastungen sind auf die Primärproduktion konzentriert. Die Gesamtextraktionsmengen (ca. 150 Mio. Tonnen) bedingen starke Eingriffe in die jeweilige Landschaft. Zudem fallen pro Tonne Mangan hinsichtlich Versauerung ca. 17 kg SO₂-Äquivalente an, hinsichtlich terrestrischer Eutrophierung 1,8 kg PO₄-Äquivalente und hinsichtlich Treibhausgaseffekts 2,5 t CO₂-Äquivalente – alle drei fast ausschließlich in der Verarbeitung und Produktion. Der spezifische TMR beträgt 13 t/t Mangan, der KRA beträgt 10 t/t Mangan bei einem Flächenverbrauch von 0,66 m²/t Mangan. Rund zwei Drittel des KRA und des Flächenverbrauchs werden den Phasen Verarbeitung und Produktion zugeordnet.

Relevante Umweltbelastungen in den nachfolgenden Prozessen sind nicht bekannt.

Materialverluste

Nach den Berechnungen dieser Arbeit beträgt der gesamte jährliche Manganverlust bis zu 7,5 Mio. Tonnen (ca. 59 % der Fördermenge), davon tritt mehr als die Hälfte bei Gewinnung und Aufbereitung auf (4 Mio. Tonnen), vor allem im Feinkornbereich infolge mangelhafter Klassierung. Es handelt sich um den größten Materialverlust von den untersuchten Metallen. Bei der Verarbeitung in der Edelstahlproduktion gehen ca. 1,8 Mio. Tonnen (24 %) verlustig. Daneben gehen je ca. 10 % des Gesamtverlustes während des Stahlrecyclings (downcycling) sowie durch dissipative Verwendung bzw. feinverteilten Einsatz (chemische Industrie bzw. Batterien) verloren). Nur ein geringer Anteil von 2 % tritt bei der eigentlichen Stahlherstellung auf (als Schlackebildner bei der Stahlherstellung bzw. beim Legieren von Edelstählen).

5.4.5 Nickel

Umweltbelastungen

Bei der Primärproduktion bedingen die Gesamtextraktionsmengen (ca. 230 Mio. Tonnen) starke Eingriffe in die jeweilige Landschaft. Die spezifischen Umweltbelastungen von Nickel sind sehr abhängig von den Ausgangserzen (die Reserven der sulfidischen und der lateritischen Erze sind ähnlich bedeutend). Insbesondere durch den Abbau von Lateriten werden relativ große Flächen in Anspruch genommen. Bei sulfidischen Erzen können saure Grubenwässer (AMD) von Abraum und den Aufbereitungsbergen zu einer lokalen Belastung mit Schwermetallen und Versauerung von Grund- und Oberflächenwässern führen; Abraum und Berge betragen

durchschnittlich ca. 120 t/t Nickel. Infolge der Aufbereitung der sulfidischen Erze tritt Wasserverschmutzung durch Schwermetalle, Säure und Thiosalze auf. Bei der Verhüttung fallen Laugereirückstände und Flugstäube (beide vor allem bei Lateriten) sowie Anodenschlämme und Schwefelsäure (vor allem sulfidische Konzentrate) auf. Cadmium, Quecksilber und Blei können in die Luft oder aquatische Systeme freigesetzt werden.

Relevante Umweltbelastungen in den nachfolgenden Prozessen sind nicht bekannt.

Materialverluste

Die jährlichen Verluste von Nickel machen insgesamt ca. 680.000 t/a aus (ca. 45 % der Fördermenge). Fast 40 % treten im Recycling- bzw. Abfallbereich auf: Zwei Drittel davon gehen auf die Deponien, ein Drittel per *downcycling* in niedrigwertige Legierungen verloren. Knapp 170.000 t/a treten bei der Gewinnung und ca. 70.000 t/a bei der Aufbereitung auf. Weitere 74.000 t gehen bei der Verhüttung verloren. Industrieabfälle fallen mit 20.000 t/a (3 %) nicht ins Gewicht.

5.4.6 Palladium

Umweltbelastungen

Bei der Primärproduktion bedingen die Gesamtextraktionsmengen starke Eingriffe in die jeweilige Landschaft. Der TMR beträgt ca. 100.000 t/t Palladium, was eine Gesamtextraktion von ca. 23 Mio. Tonnen Primärmaterial jährlich bedingt. Bei der Aufbereitung aus den sulfidischen Erzen entstehen große Mengen Schwefeldioxid, pro Tonne ca. 1,5 t SO₂-Äquivalent, die regional zu saurem Regen führen können.

Relevante Umweltbelastungen in den nachfolgenden Prozessen sind nicht bekannt.

Materialverluste

Da Palladium als Nebenprodukt gewonnen wird, werden während der Primärproduktion keine Verluste festgestellt, sondern lediglich in Nutzung und Recycling. Von den 180 t/a Verlust treten 80 % im Recycling auf. Mit 110 t/a ist der Verlust in Katalysatoren, die nach der Entsorgung nicht ordnungsgemäß rezykliert werden, mit Abstand der größte Beitrag. Es folgen die Elektroaltgeräte mit 7-21 t/a sowie die Industriekatalysatoren mit über 13 t/a. Dentalmedizin ist hier vernachlässigbar. Die übrigen 20 % gehen in der Nutzungsphase verloren, ein Großteil durch Elektroaltgeräte und Dentalmedizin; hier ist der Beitrag der Autokatalysatoren vernachlässigbar.

5.4.7 Silber

Umweltbelastungen

Bei der Gewinnung von Silber wird durch die Gesamtextraktion (ca. 150 Mio. Tonnen pro Jahr) stark in die Landschaft eingegriffen. Werden sulfidische Erze abgebaut, können saure, schwermetallhaltige Bergbauwässer die Umwelt, insbesondere das Grundwasser, belasten. Bei der Aufbereitung treten je nach Ausgangserz verschiedene Belastungen auf: Während bei Silbererzen die Belastung von Natriumcyanid bedeutend ist, dominieren bei Bleierzen die Bleistäube und bei Kupfererzen die Abwasserbelastung mit Schwefelsäure. Bei der Verarbeitung von Silber zu Halbzeug und Silberlegierungen können im Rahmen des Schmelzprozesses Kohlenmonoxid-Emissionen aufkommen.

Im Rahmen der Produktion und Nutzung dominiert die dissipative Verwendung des Silbers in der Fotografie; die Belastung durch Nanopartikel aus Silber wird aktuell intensiv diskutiert.

Materialverluste

Die jährlichen Gesamtverluste von Silber werden zu ca. 24.000 t/a bestimmt (was der Fördermenge des reinen Metalls entspricht); mangels Lagerbildung gelangt daher das gewonnene Silber quasi vollständig in die Deponien und die Umwelt bzw. andere Senken. Mehr als 75 % (19.000 t/a) davon gehen in der Nutzungsphase verloren. Während der Gewinnung der Erze gehen ca. 10 % über den Abraum verloren. Die restlichen Verluste teilen sich auf auf das Recycling und die Aufbereitung. Die Verluste bei der Aufbereitung, meist Rückstände in Lösungen, sind relativ unsicher, doch werden bezogen auf den Gesamtverlust unter 6 % abgeschätzt.

5.4.8 Titan

Umweltbelastungen

Im Rahmen der Gewinnung von Titan ist von bedeutender Landschaftsveränderung durch Flächeninanspruchnahme auszugehen. Die Gesamtextraktionsmenge von Primärmaterial beträgt ca. 1.600 Mio. Tonnen. Je nach hauptsächlichem Mineral der Titanerze dominieren unterschiedliche Umweltbelastungen, darunter die Störung von Oberflächengewässern (Rutil) sowie Grundwasserabsenkung und die Luftbelastung durch Sprenggase (Ilmenit). Bei der Aufbereitung treten Luftbelastungen durch Chlor und Wasserbelastungen durch Flotationschemikalien und Schwefelsäure auf. Die Wasserbelastung durch Kühlschmiermittel bei der spanenden Bearbeitung wird als

relativ gering eingeschätzt.

Relevante Umweltbelastungen in den nachfolgenden Prozessen sind nicht bekannt.

Materialverluste

Zu Titan konnten in dieser Studie keine ausreichenden Angaben zu Metallverlusten ermittelt werden.

5.4.9 Zink

Umweltbelastungen

Die bekannten Umweltbelastungen sind auf die Primärproduktion konzentriert. Bei der Primärproduktion bedingen die Gesamtextraktionsmengen (ca. 230 Mio. Tonnen) starke Eingriffe in die jeweilige Landschaft. Pro Tonne Zink fallen hinsichtlich Treibhausgasen ca. 2,9 t CO₂-Äquivalente an und hinsichtlich Versauerung 36 kg SO₂-Äquivalente, wovon 80-85 % den beiden Phasen Verarbeitung und Produktion zuzuordnen ist und der Rest den Phasen Gewinnung und Aufbereitung. Bei der terrestrischen Eutrophierung fallen pro Tonne Zink ca. 1,9 kg PO₄-Äquivalente an, davon gut die Hälfte in Gewinnung und Aufbereitung. Der KRA beträgt 17 t/t Zink bei einem Flächenverbrauch von ca. 0,86 m²/t Zink. Bei beiden Belastungen überwiegt der Anteil, der aus der Gewinnung und Aufbereitung stammt (65 % bzw. 86 %). Bei hydro-metallurgischen Prozessen werden zudem VOC und Säurenebel potentiell freigesetzt. Relevante Umweltbelastungen in den nachfolgenden Prozessen sind nicht bekannt.

Materialverluste

Die jährlichen Zinkverluste sind mit 5.100.000 t/a (ca. 47 % der Fördermenge) die zweitgrößten der untersuchten Metalle. Je ein Viertel treten in der Nutzung und dem Recycling auf (je 1.300.000 t/a). Die Zinkverluste bei der Gewinnung und Aufbereitung machen mit über 1.600.000 t/a den größten Beitrag aus. Bei der Verarbeitung und Produktion fallen immerhin noch 900.000 t/a an.

5.4.10 Zinn

Umweltbelastungen

Die bekannten Umweltbelastungen sind auf die Primärproduktion konzentriert. Bei der Primärproduktion bedingen die Gesamtextraktionsmengen (ca. 640 Mio. Tonnen) sehr starke Eingriffe in die jeweilige Landschaft. Pro Tonne Zinn fallen hinsichtlich Treibhausgasen ca. 17 t CO₂-Äquivalente an, hinsichtlich Versauerung 420 kg SO₂-Äquivalente und hinsichtlich terrestrischer Eutrophierung 21 kg PO₄-Äquivalente. Der KRA beträgt ca. 1.200 t/t Zinn bei einem Flächenverbrauch von ca. 120 m²/t Zinn. Die Umweltbelastungen verteilen sich auf ca. 60 % auf die Phasen Gewinnung und Aufbereitung, der Rest auf Verarbeitung und Produktion.

Beim Einsatz in Bioziden in Form von Organozinnverbindungen sind toxische Wirkungen auf aquatische Systeme berichtet. Diffuser Abtrag aus PVC-Stabilisatoren kann die Innenraumluft toxisch belasten. Weitere Umweltbelastungen sind nicht bekannt.

Materialverluste

Die jährlichen Gesamtverluste betragen für Zinn ca. 150.000 t/a (ca. 42 % der Fördermenge). Die Materialverluste treten überwiegend in der Nutzungsphase auf: Gegen 60 % der 150.000 t/a gehen dort durch verschiedenen Nutzungen verloren, vor allem als diffuser Abtrag von PVC-Stabilisatoren, aber auch in Form von Weißblechverpackungen. Der zweitgrößte Anteil sind Zinnverluste beim Abbau, die ca. 30 % der Gesamtverluste ausmachen. Demgegenüber sind die Verluste in der Verarbeitung und Produktion mit 3.000 t/a vernachlässigbar (nur 2 %). Weitere 12 % treten beim Recycling von Weißblechverpackungen auf.

5.5 Diskussion der Ergebnisse

5.5.1 Methodische Einschränkungen

Problematik der Vielfalt von Prozessen

Die Prozesse des Referenz-Metallsystems unterscheiden sich für die verschiedenen Metalle teils deutlich. Das bedeutet, dass sich die Darstellungen der Stoffflusssysteme unterscheiden würden, würde man für jedes der Metalle eine individuell angepasste (Stofffluss-)Analyse anstreben. Das Ziel einer synoptischen Darstellung der Ergebnisse erfordert daher strukturiertes Vorgehen. Die Schwierigkeit besteht darin, die Vergleich-

barkeit zu erhalten und ausreichend Raum für die Darstellung der metallspezifischen Eigenheiten bereitzustellen.

Von zentraler Bedeutung war die Anforderung, die Prozessdefinitionen für die einzelnen Metalle geeignet zu wählen. So weichen die Herstellungsprozesse der teils sehr verschiedenen Metalle voneinander ab. Zudem koexistieren im Allgemeinen jeweils mehrere Verfahren zur Gewinnung eines bestimmten Metalls, was eine Verallgemeinerung erschwert. Im Extremfall sind diese Verfahren lagerstättentyp-spezifisch definiert, was die Vielfältigkeit weiter erhöht und eine kompakte Dokumentation wesentlich erschwert. Bei dieser Untersuchung, in der auch die Vergleichbarkeit zwischen den Metallen eine große Rolle spielte, wurde ein sogenanntes „Standardsystem“ gewählt, das anschließend in Maßen den Anforderungen des Metalls individuell angepasst werden konnte (Abbildung 5.1). Dieses Vorgehen stellt die angestrebte Vergleichbarkeit sicher, ohne die Systeme in ein starres Korsett zu drängen und die Verständlichkeit zu erschweren. Als weitere Maßnahme wurde, sofern keine Angaben zur Häufigkeit des Einsatzes der einzelnen Prozesse vorlagen, die Bedeutung der Prozesse eingeschätzt und entsprechend selektiert. Letztlich floss auch die Datenverfügbarkeit bzw. Intensität der wissenschaftlichen Bearbeitung der Prozesse (in Fachartikeln) in diese Einschätzung mit ein.

Koppelproduktion

Werden innerhalb eines Prozesses mehrere Produkte hergestellt (in der Regel ein Hauptprodukt und ggf. ein bis mehrere Nebenprodukte), so werden in Lebenszyklusanalysen die Umweltbelastungen etc. den einzelnen Produkten anteilmäßig zugerechnet. Dies kann nach dem Gewicht der Produkte erfolgen, bei Metallen, insbesondere seltenen, wertvollen Metallen, wird in der Regel nach dem ökonomischen Wert der Produkte alloziert.

Bei einigen der untersuchten Metalle handelt es sich um Koppelprodukte. Da in dieser Untersuchung keine kompletten Lebenszyklusanalysen durchgeführt wurden, musste diese Problematik vereinfacht behandelt werden. Bei der Recherche wurden die vorliegenden Fälle in der Form übernommen, wie sie in der Literatur vorlagen. In der Regel handelt es sich um monetäre Allokationen.

Dynamische Systeme und heterogene Berichtszeiträume

Die technischen Verfahren und noch mehr die umgesetzten Stoffmengen verändern sich zuweilen relativ rasch. Es handelt sich also bei den Metallsystemen also um Momentaufnahmen von dynamischen Systemen, die sich in Einzelfällen auch im Jahresrhythmus markant ändern können.

Die Stoffflusssysteme bilden für die Flüsse und Lager im Allgemeinen das aktuellste Jahr ab, für das Daten verfügbar sind (in der Regel ca. 2008). Gleichzeitig wurde bei der Datenauswahl versucht, für jedes der Stoffflusssysteme möglichst einheitliche Bezugsjahre zu verwenden. Da die Datenlage unvollständig ist, musste teils auf Daten abweichender Bezugsjahre zurückgegriffen werden, um Datenlücken zu minimieren. Bei der Diskussion der Metallsysteme, insbesondere bei Vergleichen zwischen den Metallsystemen, ist diese Gefahr einer Fehlinterpretation aufgrund verschiedener Bezugsjahre zu berücksichtigen.

Datenlücken

Eine Eigenschaft von „seltenen Metallen“ ist, dass die Datenlage zu ihnen bzw. die Verlässlichkeit der Daten eingeschränkt ist – teils in ausgeprägtem Maße. Recherchen waren entsprechend aufwändig, und häufig musste trotzdem zum Erreichen des Ziels Kompromisse eingegangen werden. Dies bedeutet, dass zum Teil auch ältere Angaben (Referenzen) aufgenommen wurden, oder welche, die nur für eine bestimmte Region gültig sind und anschließend hochgerechnet werden mussten auf die Welt. Wo globale Daten fehlten, wurden europäische bzw. deutsche Daten hochgerechnet.

Aufgrund der eingeschränkten Datenlage und des zuvor beschriebenen iterativen, zielorientierten Vorgehens erheben diese Untersuchungen keinen Anspruch auf Vollständigkeit. Selbst dort wo ausreichend Daten vorhanden sind, ist in manchen Fällen mangels Konsistenz keine vollständige Bilanzierung möglich. Bezogen auf die Übersichtsmatrix bedeutet dies, dass trotz bestmöglicher Zusammenfassung die Darstellung teils lückenhaft bleibt.

Datenlücken sind im Rahmen dieser Untersuchungen transparent dokumentiert. Sie sind ein Ergebnis, das während der Diskussion genutzt werden kann.

5.5.2 Zusammenfassende Bewertung der Untersuchungen zu den zehn Metallen

Materialverluste

Die voranstehenden Ergebnisse aus Kap. 5.4 sind Basis für eine metallübergreifende qualitative Diskussion der Verbesserungspotentiale und fördern zudem das Problemverständnis hinsichtlich des Umgangs mit Metallen. Die Stoffflusssysteme der einzelnen Metalle variieren wie erwartet stark. Im Folgenden sind ausgewählte,

metallübergreifende Ergebnisse⁴⁰ erläutert. Bezogen auf die Materialverluste ergab sich folgendes, differenziertes Bild:

- *Relative Materialverluste aus der Nutzungs- und Recyclingphase:* Dies sind die jährlichen Materialverluste aus Nutzung und Recycling bezogen auf den jährlichen Metallinput in den Prozess „Nutzung“; es handelt sich also um das minimale Recyclingpotenzial⁴¹, das während Nutzungsphase und Recycling besteht⁴² (es würde durch weitere im Inland angesiedelte Prozesse erhöht). Die Werte schwanken um den Faktor Acht; so betragen sie bei Zinn über 70 %, bei Gold weniger als 10 %;
- *Relative Gesamtmaterialverluste:* Dies sind die gesamten jährlichen Materialverluste entlang des Lebensweges bezogen auf den jährlichen Input in die Nutzung. Sie betragen zwischen ca. 110 % bei Mangan und ca. 20 % bei Gold; es handelt sich also um das maximale Recyclingpotenzial, das global besteht.

Die Verluste der anderen Metalle liegen jeweils zwischen den genannten Extremwerten. Die Studie klärte zudem auf, in welchen Lebenszyklusabschnitten die relevanten Materialverluste auftreten (Tab. 5-1, Kap. 5.4 Matrizen zu Umweltbelastungen/Materialverlusten der zehn Metalle).

Bei einer Bewertung der Materialverluste zwischen den Metallen und entlang der Prozesskette ist von entscheidender Bedeutung, dass die Umweltrelevanz der Materialverluste variiert (sowohl zwischen Metallen, als auch entlang der Prozesskette⁴³); für einen Vergleich der spezifischen Umweltbelastungen, welche den Materialverlusten zugeordnet werden können, ist die bisherige Datenlage nicht ausreichend. Hier sind weitere Arbeiten zur Verbesserung der Datenlage erforderlich.

⁴⁰ Weitergehende Ansätze zur Minimierung der Materialverluste, beispielsweise Dematerialisierung oder Produktionsintegrierter Umweltschutz) können nicht im Rahmen der vorliegenden Studie beurteilt werden und erfordern zusätzliche Untersuchungen.

⁴¹ Der Begriff „Recyclingpotential“ bezieht sich auf die aktuell vorherrschende Nutzungsweise

⁴² Insofern befindet sich dieses Potenzial im Einflussbereich nationaler Politik, im Gegensatz zu den Potenzialen von Prozessen, die im Ausland statt finden und im "relativen Gesamtmaterialverlust" zusätzlich enthalten sind.

⁴³ Die Umweltbelastungen sind sowohl metallspezifisch, als auch prozessspezifisch: Der "ökologische Rucksack" eines Kilogramms Gold, das in die Nutzung geht, ist deutlich höher, als eines Kilogramms Gold, das in die Aufbereitung geht (die Umweltbelastungen kumulieren entlang der Prozesskette).

Tab. 5.1: Übersicht über die Verluste und den jährlichen Gesamtmaterialverlust der untersuchten Metalle⁴⁴. Werte gerundet auf 5 %. Die Symbole kennzeichnen die Bedeutung der Verluste aus den einzelnen Prozessen: xxx = Anteil grösser 25 %, xx = Anteil zwischen 25 und 10 %, x = kleiner 10 %, o = keine nennenswerten Verluste, k.A. = keine Angabe.

	Au	In	Mn	Ni	Pd	Ag	Zn	Sn
Gewinnung	xxx	k.A.	o	xxx	xx	xx	k.A.	o
Aufbereitung	k.A.	xxx	xxx	xx	x	xx	xxx	xx
Verarbeitung	k.A.	k.A.	xxx	xx	x	k.A.	k.A.	x
Produktion ⁴⁵	xx	x	x	x	x	k.A.	xx	
Nutzung	x	x	xx	xxx	xx	xxx	X	xxx
Recycling ⁴⁶	xxx	x	k.A.	k.A.	xxx	xx	k.A.	k.A.
Relativer jährlicher Verlust [%]	15-20	50	110	40-45	65	35	30	80-85

Umweltbelastungen

In der nachfolgenden Tabelle sind Schlussfolgerungen zu den Ergebnissen der einzelnen Metalluntersuchungen tabellarisch zusammengefasst (Tab. 5.2). Dabei ist die Reihenfolge der Metalle nach der „Größenordnung der Umweltrelevanz“ sortiert, hier definiert als Anteil des *globalen TMR des spezifischen Metalls* am *globalen TMR aller Metalle* (d. h. aufsummiert über die 60 untersuchten Metalle ergibt). Die Abfolge zeigt an, dass im Vergleich zwischen den untersuchten Metallen die Metalle Indium und Gallium eine relativ geringe Umweltrelevanz aufweisen, im Gegensatz dazu Gold, Titan und Zinn eine relativ hohe Umweltrelevanz.

⁴⁴ Für eine Beurteilung der Verluste von Gallium und Titan lagen keine ausreichenden Ergebnisse vor, auf eine Darstellung wurde daher verzichtet.

⁴⁵ Produktion umfasst gegebenenfalls die Raffination.

⁴⁶ Inklusive sogenanntem *downcycling*, bei dem das Metall seine spezifische Funktionalität verliert. In der Regel ist damit ein deutlicher Wertverlust verbunden.

Die zehn Metalle lassen sich nach bisherigem Kenntnisstand gemäß Schwerpunkt der Umweltbelastung entlang des Lebenszyklus in drei Gruppen einteilen (vgl. Matrizen, Kap. 5.4):

1. Edelmetalle Gold, Silber und Palladium: Die Umweltbelastung konzentriert sich auf die Gewinnung und Aufbereitung. Bei Silber kommt es daneben zu auch Emissionen infolge der Nutzung (Fotografie, Nanopartikel).
2. Zinn und Zink sowie die Stahlveredler Nickel und Mangan: Bei diesen Metallen sind die relevanten Umweltbelastungen auf die Gewinnung, Aufbereitung, Verarbeitung und Produktion zurückzuführen.
3. Die Nebenprodukte Gallium und Indium: Bei Ihnen konzentriert sich die Umweltbelastung auf die Aufbereitung (die Umweltbelastung bei der Gewinnung wird den Hauptprodukten zugeordnet).

Tab. 5-2: Zusammenfassung der Ergebnisse der Untersuchungen zu den Metallen. Die Größenordnung der Umweltrelevanz ist ausgedrückt als relativer Anteil des globalen TMR des Metalls am globalen TMR aller Metalle, wobei der globale TMR_{Me} das Produkt aus Produktionsmenge_{Metall} (2007) und TMR_{Metall} ist.

Metallspezifisches Fazit		
Größenordnung der Umweltrelevanz: relativer Anteil am globalen TMR aller Metalle x 10⁶		
Ti	Sehr hohe Primärextraktion; 95 % des Titans werden als Titandioxid letztlich dissipativ eingesetzt; dadurch offenes Durchflusssystem	35.000
Au	Umweltrelevanz durch großen ökologischen Rucksack; relevante Verluste bei Gewinnung sowie bei Sammlung und Aufbereitung insbesondere von Elektronikaltgeräten	29.000
Sn	Hohe Primärextraktion; Weißblechrecycling bildet Senke	14.000
Ni	Recycling weitgehend umgesetzt über Spezialstähle; relevante Verluste durch nicht genutzte Bergbauabfälle	5.100
Zn	Ein Drittel des Zinks wird als Korrosionsschutz für Eisenblech und Baustahl eingesetzt, womit zwangsläufig dissipative Verluste einhergehen. Zudem fördert die Zinkerzgewinnung Cadmium zu Tage	5.000
Pd	Wesentliche Verluste über Autokatalysatoren, weniger über WEEE	4.100
Ag	Überwiegender Einsatz in industriell gefertigten Produkten, insbesondere Elektronik, führt zu Verlusten	3.300
Mn	Praktisch keine Rezyklierung, endet in der Schlacke der Stahlaufbereitung; dadurch linearer Durchsatz	3.200
In	Nebenprodukt hauptsächlich der Zinkproduktion	49
Ga	Nebenprodukt der Aluminiumproduktion; Einsatz in geringen Mengen, vermutlich auch künftig stagnierend; keine Umweltrelevanz	24

Die Ergebnisse der Metalluntersuchungen bieten – trotz Lücken – einen geeigneten Ansatzpunkt zum Entwickeln der politischen Handlungsoptionen auf Basis des Problemverständnisses, das anhand dieser Untersuchungen entwickelt werden konnte. Dabei ist festzuhalten, dass zwar jedes Metall seine spezifischen *hot spots* der Umweltbelastungen und Verluste aufweist, es jedoch einige generelle Strategien gibt, von denen Handlungsoptionen abgeleitet werden können; die metallspezifischen *hot spots* sind im Folgenden eingerückt dargestellt:

- Bei vorwiegend dissipativ eingesetzten Metallen (Titan, Mangan) bzw. bei signifikant dissipativen Einsatzbereichen (Zinn, Zink) handelt es sich um offene Durchflusssysteme, deren Verluste nur über ein verändertes Design der Endprodukte bzw. deren dauerhaftere Gestaltung oder effizientere Nutzung verringert werden kann.
 - Mangan: hohe Effizienzsteigerung hauptsächlich nur über sparsameren Einsatz von manganhaltigem Stahl möglich.
 - Titan: deutliche Effizienzsteigerungen vermutlich nur über dauerhaftere Beschichtungen und Farben, längere Nutzungsdauern von damit behandelten Produkten und die Verwendung anderer Farben als „strahlendes Weiß“
 - Zinn: Weißblechrecycling bildet Senke, daher sollte die Substitution durch andere Verpackungsmaterialien verstärkt geprüft werden.
 - Zink: Der Einsatz als Korrosionsschutz für Eisenblech und Baustahl führt zwangsläufig zu dissipativen Verlusten, die sich nur durch einen sparsameren Einsatz dieser Materialien und eine Substitution durch korrosionsbeständigere Materialien verringern lassen.
- Generell können die Umweltbelastungen und Verluste durch die untersuchten Metalle über eine effizientere Gestaltung und Verwendung der Endprodukte verringert werden, wenn diese zur Verminderung der stofflichen Nachfrage führt. Es kann auch durchaus sein, dass eine effektive Handlungsoption außerhalb des jeweiligen Metallsystems zu suchen ist (z.B. bei Mangan, wo ein effizienterer Einsatz der damit ausgerüsteten Stähle entscheidend ist).
 - Nickel: Eine deutliche Verminderung der Umweltbelastungen durch die Nickelkette ist letztlich nur über effizienteren Einsatz von nickelhaltigen enthaltenden Vor- und Fertigprodukten möglich.
- Verschiedene wertvolle Metalle werden in relativ geringen Mengen pro Produkt in den gleichen Produktgruppen eingesetzt. Dadurch ergibt sich die Chance, diese Stoffflüsse durch gemeinsame Sammlung, Verwertung und gezieltes Recycling einerseits zu bündeln und andererseits als Sekundärrohstoff für die Substitution von Primärmaterial einzusetzen. Dies betrifft die Metalle Gold, Silber, Palladium, Zinn und Indium in Altfahrzeugen und ihren Komponenten (Katalysatoren) und in Elektro- und Elektronikabfällen.
 - Palladium: Wesentliche Verluste über Autokatalysatoren, weniger über WEEE; für beides müssen Sammlung und Aufbereitung verbessert und die Zuführung zu hochwertigem Recycling sichergestellt werden (vgl. MaRes Arbeitsschritt 2.2).

- Silber: Überwiegender Einsatz in industriell gefertigten Produkten, insbesondere Elektronik, führt zu Verlusten; hier müssen Sammlung, Aufbereitung und Recycling (WEEE, behandelte Textilien) sowie das Produktdesign verbessert werden (ggfs. mit Substitution von Silber).
- In Einzelfällen können Aufbereitungsrückstände, die bislang aus ökonomischen Gründen deponiert oder zwischengelagert wurden, künftig nutzbar gemacht werden und so zur Ressourcenschonung beitragen (z.B. Indium, Silber). Zu diesem Zweck ist auf eine prophylaktische geeignete Trennung der Rückstände zu achten.
- Indium: Nutzung von bislang ungenutzten Haldeninhalten der Zinkaufbereitung; produktionsinternes Recycling schon sehr ausgeprägt; EoL-Recycling erst künftig relevant und potenziell lohnenswert über steigende Mengen in WEEE, wozu verbesserte Sammlung, Aufbereitung und Recyclingprozesse nötig sind.

6 Handlungsoptionen

In Kombination mit den spezifischen in den zehn Studien im Rahmen dieser Arbeit ermittelten Recyclingpotenzialen⁴⁷ wurde Handlungsbedarf festgestellt. Im Folgenden werden entsprechende Handlungsoptionen angeführt, die darauf zielen, die Umweltbelastungen und Materialverluste zu mindern.

Zu diesem Zweck wurde ein Screening von abgeschlossenen Studien durchgeführt. Wissenschaftliche und nicht-wissenschaftliche Artikel sowie Berichte wurden gezielt nach Handlungsoptionen metallübergreifend untersucht. Die empirischen Ergebnisse wurden inhaltlich zu folgendem, nicht abschließendem Set von Handlungsoptionen zusammengestellt:

- Erhöhung der Sammelmenge von Altprodukten, die seltene Metalle in relevanten Mengen enthalten, in Deutschland und im Ausland; zum Beispiel von Elektroaltgeräten, die signifikante Mengen an Palladium, Gold und Silber enthalten, sowie von Altbatterien hinsichtlich ihres Mangan Gehaltes;
 - Lötzinn-Rezyklierungsrate könnte mit der Ausweitung von WEEE steigen;
- Aufbau bzw. Adaption bestehender produktgruppenspezifischer Sammelsysteme z.B. für Kraftfahrzeuge oder IKT, in Entwicklungsländern durch staatliche oder privatwirtschaftliche Programme, um ein anschließendes Recycling unter Anwendung der *best available techniques* vor Ort oder in entwickelten Ländern⁴⁸ zu ermöglichen; dabei Bewahrung funktionierender Sammelsysteme mit günstigen Beschäftigungseffekten und Verminderung von Gesundheits- und Umweltbelastungen im informellen Recyclingsektor;
- Aufbau von länderübergreifenden Redistributionssystemen für Schrotte spezifischer Produktgruppen, welche für die Bewirtschaftung seltener Metalle relevant sind; zum Beispiel sollten im Rahmen der Ausweitung der Produktverantwortung für Katalysatoren in Altfahrzeugen die Sammelleistung in Ländern unterstützt werden, wo die Materialverluste am größten sind. Mögliche Maßnahmen sind die logistische

⁴⁷ Es ist zu beachten, dass die Materialverluste in dieser Studie als "theoretisches" (das bedeutet maximal zu vermutendes) Potenzial zur Verminderung von Verlusten angesehen werden. In einem weiteren Schritt sollten daher die verschiedenen technologischen und institutionellen Möglichkeiten hinsichtlich des „praktischen“ Potenzials bewertet werden, die Materialverluste zu verringern.

⁴⁸ Bei der Verschiffung von demontierten und selektierten Schrottbestandteilen zu (europäischen) BAT-Recyclinganlagen spricht man von *best of two worlds approach* BAT. BAT bedeutet *best available techniques*.

Unterstützung von Sammelsystemen, Fachschulungen oder Abnahmevereinbarungen; mögliche Adressaten sind Hersteller von Fahrzeugen und/oder Katalysatoren bzw. Recyclingspezialfirmen (via freiwillige Selbstverpflichtung) (vgl. Arbeitsschritt 2.2); Anreiz für die Adressaten könnte die Sicherstellung langfristiger Sekundärrohstofflieferungen sein;

- Förderung einer tiefergehenden händischen bzw. automatisierten Zerlegung und Sortierung von Altgeräten, die eine seltene Metalle in relevanter Menge enthalten und bei denen die Rückgewinnungsrate erhöht werden kann, z.B. von Elektronikschrotten (Laufwerke, Netzteile) oder Kfz. Hierfür muss in weiteren Projekten präzisiert werden, welche Bauteile die größten Potenziale beinhalten;
- Monitoring der Altgüterströme und der rückgewonnenen Metallmengen zur Ergebniskontrolle (Effektivität und Effizienz des Recyclings);
- Monitoring der Schnittstellen der Recyclingketten zur Erhöhung der Markttransparenz, dabei Einbezug aller am Aufbereitungsprozess beteiligten Akteure (Sammlung, Behandlung, Recycling);
- Aufbau eines kontinental bis regional angepassten Angebots von produktspezifischen Behandlungs- und Recyclingprozessen, das weltweit die Effektivität der Rückgewinnung seltener und edler Metalle durch differenzierte Behandlung der Altprodukte und Zuführung zu hochtechnischen Recyclinganlagen verbessert;
- Regelmäßige Bilanzierung der Behandlungsprozesse hinsichtlich seltener Metalle mit dem Ziel der Prozessoptimierung zur Aufkonzentrierung von seltenen Metallen in Recyclingfraktionen;
- Vergleichende Analyse und Bewertung von Re-Use und Recycling im Hinblick auf Rohstoffverbrauch und Umweltbelastungen unter Beachtung regionaler und produktgruppenspezifischer Unterschiede der Recyclingsysteme;
- Klassifizierung und Zertifizierung von Recyclingtechnologien nach Kriterien der Ressourceneffizienz und der Ressourcenschonung (Minderung des Rohstoffaufwandes und der Umweltbelastungen im Vergleich zur Primärroute);
- Kooperative Governance mit dem Ziel, verbindliche Qualitätsstandards der Behandlung und des Recyclings zu erreichen, ggf. Zertifizierung der Akteure (vgl. MaRes Arbeitsschritt 2.2);
- Formulierung eines nationalen bzw. internationalen Ziels zur Verminderung des Primärrohstoffverbrauchs von Metallen unter Einbezug der zur Produktion

importierter Güter über die gesamte Produktionskette hinweg eingesetzten Rohstoffe, dabei Fokus auf ausgewählte Sektoren, in denen relevante Recyclingpotenziale bestehen (z.B. die Rückgewinnung eines bestimmten Anteils des Goldes aus Elektroaltgeräten und/ oder der Einsatz einer Mindestmenge von Sekundärmetallen in der Produktion);

- Lokalisierung von Marktversagen und Erarbeiten von möglichen Rahmenbedingungen, die die Markteinführung effektiver, aktuell unrentabler Behandlungs- und Recyclingsysteme für seltene Metalle ermöglichen.

Daneben ist die geographische Komponente der Stoffflüsse seltener Metalle zu berücksichtigen: Gewinnung, Produktion, Nutzung und das Recycling von Alt- und Neuschrotten sind im Allgemeinen räumlich heterogen verteilt. Aufgrund der geringen Umsatzmengen bei den seltenen Metallen und der hohen Investitionskosten für Hightech-Recyclinganlagen sind nur relativ wenige zentrale Recyclinganlagen rentabel. Der Rückführung der seltenen Metalle nach der letzten Nutzung in die Rückgewinnung kommt damit eine wichtige Rolle zu. Die Herausforderung besteht darin, die Abfallphase von Altprodukten – vor allem wertstoffhaltiger Elektrokleingeräte – so zu organisieren, dass sie möglichst vollständig gesammelt werden. Neben der Sammlung ist die Behandlung vor dem eigentlichen Recycling entscheidend: Hier müssen die Altprodukte so sortiert und separiert werden, dass die seltenen Metalle möglichst vollständig in Fraktionen gelangen, die dann den hochspezialisierten Recyclinganlagen zugeführt werden. Es ist also aus ressourcenpolitischer Sicht erforderlich, insbesondere die grenzüberschreitenden Metallströme effektiv und effizient zu lenken und Sammel- und Behandlungssysteme aufzubauen, die eine hinreichende Sammlung und Aufbereitung sicherstellen.

Da bei jedem Lebenszyklus der Produkte erneut Verluste auftreten, kommt neben dem Recycling der tatsächlichen Produktlebensdauer⁴⁹ für die Erhöhung der systemweiten Ressourceneffizienz potenziell eine relevante Rolle zu. Häufig konkurriert jedoch die Verlängerung der Produktlebensdauer mit Fortschritten in der Energieeffizienz, Fortschritten in der Leistungsfähigkeit der Produkte oder auch dem Modeaspekt von Produkten. Zur Bewertung aktueller Entwicklungen von Produktlebensdauern hinsichtlich ihrer Auswirkung auf die Materialeffizienz wird vorgeschlagen, Szenarioanalysen durchzuführen.

⁴⁹ Gemeint ist hier im Gegensatz zur technischen Lebensdauer der Zeitraum vom Kauf bis zum Eintritt in das Abfallsystem.

Die Wissensbasis zu den umweltrelevanten, seltenen Metallen konnte im Rahmen von MaRes Arbeitsschritt 2.1 wesentlich erweitert und zusammengefasst werden. Trotzdem handelt es sich um einen Zwischenstand, da noch relevante Kenntnislücken und Unsicherheiten bestehen, die durch detailliertere Stoffflussanalysen auf Basis des bisher Erreichten näher untersucht werden sollten. Die größten Kenntnislücken hinsichtlich der Materialverluste bestehen bei den Metallen Gallium und Titan. Bezüglich der Umweltbelastungen über den Lebensweg bestehen bei allen Metallen relevante Lücken.

7 Abkürzungsverzeichnis

7.1 Metalle / Chemische Elemente⁵⁰

Ag	Silber
Au	Gold
Ga	Gallium
In	Indium
Mn	Mangan
Ni	Nickel
Pd	Palladium
Sn	Zinn
Ti	Titan
Zn	Zink

7.2 Physikalische Einheiten

°C	Grad Celsius
a	Jahr
cm ³	Kubikzentimeter
g	Gramm
h	Stunde

⁵⁰ Weitere Kurzformen von Metallen sind in Tab. 10.2 aufgeführt.

kg	Kilogramm
km	Kilometer
GJ	Gigajoule (10^9 Joule)
kWh	Kilowattstunde
l	Liter
lb.	<i>Pound</i> (englische Gewichtseinheit, 0,45359 kg)
M	molar
mm	Millimeter
Mt	Megatonne (10^6 Tonnen)
ppm	Teile von einer Million (von engl.: <i>parts per million</i>)
t	Tonne
TWh	Terawattstunde
μm	Mikrometer

7.3 Weitere Abkürzungen

Bei Abkürzungen, die aus dem Englischen stammen, ist die Originalbezeichnung kursiv aufgeführt.

AGS	Ausschuss für Gefahrenstoffe
AMD	<i>Acid Mine Drainage</i>
AVV	Abfallverzeichnis-Verordnung
BAT	beste verfügbare Technik (<i>best available technique</i>)
BMWi	Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie
bzw.	beziehungsweise
CIS-Solarzelle	Kupfer-Indium-Disulfid-Solarzelle
CIGS-Solarzelle	Kupfer-Indium-Gallium-Diselenid-Solarzelle
CO ₂ -Äq.	CO ₂ -Äquivalente (analog für SO ₂ - und PO ₄ -Äquivalente)
ED	Effektive Dosis
EE-Schrott	Elektro- und Elektronikgeräte-Schrott
EoL	End-of-Life
EU	Europäische Union
EuE	<i>End-use Equipment</i> . Produkte, die Energie aufnehmen, hier: Elektro- und Elektronikprodukte
f.o.b.	frei Schiff (<i>free on board</i>)
IC	Integrierte Schaltungen (<i>integrated circuits</i>)
IFA	Institut für Arbeitsschutz der Deutschen Gesetzlichen Unfallversicherung
ITRI	<i>International Tin Research Institute</i>

IuK	Information und Kommunikationstechnologie
KEA	Kumulierter Energieaufwand
KRA	Kumulierter Rohstoffaufwand
LCD	Flüssigkristallanzeige (<i>liquid crystal display</i>)
LD	letale Dosis
LED	Leuchtdiode (<i>light emitting diode</i>)
LME	<i>London Metal Exchange</i>
MAK	Maximale Arbeitsplatzkonzentration
MaRess	Projekt „Materialeffizienz und Ressourcenschonung (Projektname)“
Med	Medizintechnik
Mia.	Milliarde
Mio.	Million
MAK	maximale Arbeitsplatzkonzentration
MLCC	Keramikvielschicht-Chipkondensatoren
MVA	Müllverbrennungsanlage
N/A	entfällt bzw. keine Angabe (<i>not applicable</i>)
Nano	Nanotechnologie
NE-Metall	Nichteisenmetall
NiMH	Nickel-Metallhydrid
o.J.	ohne Jahresangabe (bei Referenzen)
OLED	organische Leuchtdiode (<i>organic light emitting diode</i>)

PGM	Platingruppenmetalle
PU	Polyurethan
PV	Photovoltaik
PVC	Polyvinylchlorid
Pkw	Personenkraftwagen
REE	Seltenerdmetalle (<i>Rare Earth Elements</i>)
RoHS	Richtlinie zur Beschränkung der Verwendung bestimmter gefährlicher Stoffe in Elektro- und Elektronikgeräten (<i>Directive on the restriction of the use of certain hazardous substances in electrical and electronic equipment</i> , commonly named: <i>Restriction of Hazardous Substances Directive</i>)
STN-Display	Displaytyp auf Basis von <i>Super-Twisted-Nematic</i> -Zellen
TFT-Display	Dünnschichttransistor-Display (<i>thin-film transistor</i>)
TMR	Globaler Materialaufwand (<i>Total Material Requirement</i>)
TRGS	Technische Regel für Gefahrenstoffe
UBA	Umweltbundesamt
US\$	US-Dollar
USA	Die Vereinigten Staaten (<i>United States of America</i>)
USGS	Geologischer Dienst der Vereinigten Staaten (<i>United States Geological Survey</i>)
VOC	flüchtige organische Verbindungen (<i>volatile organic compounds</i>)
WEEE	Elektro- und Elektronikgeräte-Abfall (<i>Waste Electrical and Electronic Equipment</i>)

8 Glossar

Das Glossar erläutert Begriffe hinsichtlich ihrer Bedeutung. Häufig haben Begriffe verschiedene Bedeutungen oder werden in verschiedenen Fachgebieten unterschiedlich verwendet. Das folgende Glossar soll eine einheitliche Nutzung der Begriffe in diesem Bericht sicherstellen und den Lesern die Abgrenzung zu Begriffen mit ähnlicher Bedeutung verdeutlichen.

Abraum: Material, das beim Abbau von Erzen und anderen mineralischen Rohstoffen im Rahmen der Extraktion anfällt, nicht verwertet werden kann und daher an der Mine abgelagert wird.

Anwendungsbereich: Unter Anwendungsbereichen werden (Wirtschafts-)Sektoren, bzw. Produktgruppen verstanden.

Altschrott: Schrotte, die nach der Nutzung metallener Produkte beim Endverbraucher anfallen. Im Gegensatz zu Neuschrotten sind sie in der Regel weniger sortenrein.

dissipative Verwendung (bezogen auf Metalle): eine unumkehrbare Verstreuung von Metall infolge seiner Verwendung (in der Regel in die Umwelt oder in andere Stoffe), z. B. durch Verbrauch bzw. Verschleiß. Ein Rezyklieren ist bei diesem Typ der Verwendung extrem erschwert, unter den gegebenen Umständen praktisch verunmöglicht.

Elektro- und Elektronikschrott: Gesamtmenge an zur Entsorgung/ Wiederverwertung anfallende Elektro- und Elektronikgeräte (BUWAL 2004).

Element: Unter Elementen werden die chemischen Elemente verstanden. Diese sind zur Übersicht im Periodensystem der Elemente aufgeführt. Die Elemente sind durch die Anzahl der Protonen pro Atom charakterisiert.

Erz: Ein Erz ist ein natürliches Mineralgemenge, aus dem im industriellen Maßstab Metalle gewonnen werden können (Meyers 1983).

Feinverteilung von Metallen: eine Feinverteilung (feine Verteilung) von Metall liegt dann vor, wenn das Metall in der Technosphäre derart verteilt ist, dass eine Rückgewinnung aufwendig ist und damit die Rezyklierbarkeit eingeschränkt. Dies ist der Fall, wenn es auf eine Vielzahl von (kleinen) Produkten verteilt ist (feine Verteilung).

von Produkten), wenn es innerhalb der Produkte in geringen Konzentrationen vorliegt, oder in Form der Produkte dissipativ eingesetzt wird.

Geologische Verfügbarkeit: Unter (lagerstätten-)geologischer Verfügbarkeit versteht man in der Regel die zeitliche Reichweite der Reserven bzw. Ressourcen als Maß für das Bereitsein von Lagerstätten zum künftigen Abbau von Rohstoffen.

Globaler Materialaufwand (engl.: *Total Material Requirement, TMR*): Der Globale Materialaufwand umfasst die Summe aller Primärmaterialentnahmen aus der natürlichen Umwelt, die mit der Herstellung, Nutzung und Beseitigung eines Produkts oder der Bereitstellung einer Dienstleistung verbunden sind bzw. diesen ursächlich zugewiesen werden können; dieser Parameter erfasst sowohl die genutzte Rohstoffentnahme als auch die ungenutzte Extraktion.

Halbmetall: Halbmetalle sind diejenigen Elemente, die sowohl metallische, als auch nichtmetallische Eigenschaften verzeichnen. Dies ist zumeist darin begründet, dass sie in einer metallischen und einer nichtmetallischen Modifikation vorkommen. Beispiele sind Arsen, Selen und Beryllium.

Kumulierter Energieaufwand: Der kumulierte Energieaufwand (KEA) gibt die Gesamtheit der Primärenergie an, die mit der Herstellung, Nutzung und Beseitigung eines Produkts oder einer Dienstleistung entsteht bzw. diesem ursächlich zugewiesen werden kann.

Kumulierter Rohstoffaufwand: Der kumulierte Rohstoffaufwand (KRA; engl.: *Raw Material Equivalent, RME*). Der KRA ist die Summe aller Rohstoffaufwendungen, die mit der Herstellung, Nutzung und Beseitigung eines Produkts oder einer Dienstleistung entstehen bzw. diesem ursächlich zugewiesen werden können; dieser Parameter bezieht sich ausschließlich auf die genutzte Rohstoffentnahme.

Metall: Metalle zeichnen sich durch die metallische Bindung aus. Hierbei sind die Valenzelektronen in der Regel delokalisiert.

Mineral: „Mineral“ ist ein Sammelbegriff für alle aus chemischen Elementen – vor allem anorganischen Elementen – bestehenden Substanzen der Erdkruste, des Erdmantels und der Planeten sowie der Meteoriten (Meyers 1983). Mineralien sind chemisch einheitliche, feste und natürlich entstandene Stoffe (Schröter et al. 1987). Die Zahl der Mineralien liegt in der Größenordnung von 2.000 bis 3.000, wobei ca. 300 häufig sind (Meyers 1983). Sie sind zumeist kristallin – manchmal auch amorph bzw. elementar strukturiert. Mineralien können sowohl nach ihrem Salztyp (Oxide, Silicate, Sulfide) als auch den wichtigsten Bestandteilen gruppiert werden. Die wichtigsten Tantalmineralien

sind beispielsweise Tantalit $\text{Fe}(\text{TaO}_3)_2$ und Columbit $\text{Fe}(\text{Nb}_2\text{O}_6) \cdot (\text{Mn,Fe})[(\text{Nb,Ta})_2\text{O}_6]$ als Mischsalz.

Neuschrott: Schrotte, die im Rahmen von Produktionsprozessen der metallverarbeitenden Industrie entstehen (Industrieschrotte), beispielsweise beim Drehen oder Fräsen. Sie sind im Vergleich zu Altschrotten in der Regel homogener und werden häufig mit relativ geringen Verlusten rezykliert.

Platingruppenmetalle: Platingruppenmetalle (PGM) ist eine Sammelbezeichnung für eine Gruppe von Metallen mit dem Platin ähnlichen Eigenschaften. Je nach Kontext variiert die Zusammensetzung der Gruppe. Hier bezieht sich der Begriff PGM auf die sechs Metalle Platin, Iridium, Osmium, Palladium, Rhodium und Ruthenium⁵¹. Die Verwendung des Begriffs weicht damit von der chemischen Definition der Platingruppenmetalle (zehnte Gruppe des Periodensystems) ab und wird synonym mit dem Begriff „Platinmetalle“ verwendet.

Seltenerdmetalle, auch Seltene Erden oder Metalle der seltenen Erden (engl.: *rare earth elements*, REE, auch *rare earth metals*): Seltenerdmetalle werden aufgrund ihrer ähnlichen Eigenschaften unter dieser Sammelbezeichnung zusammengefasst. Sie kommen in der Natur in der Regel als Oxide vor und werden deshalb auch als „Erden“ bezeichnet. Aufgrund ihrer Elektronenstruktur sind sie metallurgisch nur schwer voneinander zu trennen. Die REE umfassen Scandium, Yttrium und die Gruppe der Lanthanoide (benannt nach dem Element Lanthan, an die sie sich im Periodensystem der Elemente anschließen), das sind Cer, Praseodym, Neodym, Promethium (instabil), Samarium, Europium, Gadolinium, Terbium, Dysprosium, Holmium, Erbium, Thulium, Ytterbium und Lutetium.

Reservenbasis (engl.: *reserve base*): „That part of an identified resource that meets specified minimum physical and chemical criteria related to current mining and production practices, including those for grade, quality, thickness, and depth. The reserve base is the in-place demonstrated (measured plus indicated) resource from which reserves are estimated“ (USGS 2006, Appendix C).

Reserven (engl.: *reserves*): „That part of the reserve base which could be economically extracted or produced at the time of determination. The term reserves need not signify that extraction facilities are in place and operative. Reserves include only recoverable materials; thus, terms such as “extractable reserves” and “recoverable

⁵¹ analog der Definition im benachbarten Projekt „Weltweite Wiedergewinnung von PGM“, MaRes Arbeitsschritt 2.2

reserves” are redundant and are not a part of this classification system“ (USGS, 2006 Appendix C)⁵².

Ressourcen (engl.: resources): „A concentration of naturally occurring solid, liquid, or gaseous material in or on the Earth’s crust in such form and amount that economic extraction of a commodity from the concentration is currently or Potenziell feasible“ (USGS 2006, Appendix C)⁵².

Richtlinie zur Beschränkung der Verwendung bestimmter gefährlicher Stoffe in Elektro- und Elektronikgeräten, kurz: Beschränkung der Verwendung gefährlicher Stoffe (engl.: Directive on the restriction of the use of certain hazardous substances in electrical and electronic equipment, commonly named: Restriction of Hazardous Substances Directive, RoHS): Es handelt sich um die EG-Richtlinie 2002/95/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 27.01.2003 zur Beschränkung der Verwendung bestimmter gefährlicher Stoffe in Elektro- und Elektronikgeräten. Sie regelt die Verwendung von Gefahrstoffen in Geräten und Bauteilen, darunter auch bleifreie Verlotungen und giftige Flammschutzmittel. Praktisch werden durch die RoHS Grenzwerte für Schadstoffe definiert.

Rohstoff: Rohstoffe sind natürliche Ressourcen, die bis auf die Lösung aus ihrer natürlichen Quelle noch keine Bearbeitung erfahren haben. Sie werden aufgrund ihres Gebrauchswertes aus der Natur gewonnen und entweder direkt konsumiert oder als Arbeitsmittel und Ausgangsmaterialien für weitere Verarbeitungsstufen in der Produktion verwendet.

Seltene Metalle: Eine Definition von „seltene Metalle“ ist in der Literatur bisher nicht konsensual verfügbar. Der Begriff „selten“ ist diesbezüglich nicht definiert. „Selten“ verweist im Allg. auf Relativierungen zwischen Dingen. Es ist wesentlich, dass diese Relativierung für spezifische Sachverhalte unterschiedlich zu handhaben sind. Als Relativierungen für „selten“ im Kontext des Metallscreenings sind folgende Kategorien möglich: im geringen Umfang vorkommend (geringe Ressourcen oder Reserven), begrenzte Verfügbarkeit bei dem derzeitigen Nutzungsumfang (geringe statische oder dynamische Reichweite), Nutzung des Metalls in geringen Umfang, Nutzung des Metalls in nur wenigen Produkten, hohe oder stark gestiegene Preise für die Metalle oder Vorkommen der Metalle in nur wenigen Ländern. Im Rahmen des Metallscreenings wurden die folgenden Kriterien für „selten“ gewählt: geringe Reserven, geringe statische Reichweite sowie Nutzung im geringen Umfang. Die Analyse zeigte jedoch, dass es notwendig ist, bei den „seltenen Metallen“ noch eine Binnendifferenzierung der „Seltenheit“ zu machen. Hierbei wurden die folgenden

⁵² Die Begriffe Ressourcen und Reserven werden in der Literatur teils unscharf verwendet.

Kategorien gewählt: äußerst seltene Metalle, sehr seltene Metalle, seltene Metalle, häufigere Metalle, häufige Metalle und Massenmetalle.

Salze: Salze zeichnen sich durch eine Ionenbindung aus. Hierbei erfolgt ein Elektronenübergang von einem elektropositiven Element / Verbindung zu einem elektronegativen Element. Es gibt einfache Salze wie Natriumchlorid (NaCl) und komplexe Salze wie Magnesiumperchlorat ($\text{Mg}(\text{ClO}_4)_2$). Von den Salzen sind die Komplexverbindungen zu unterscheiden, die einen anderen Bindungstyp darstellen.

Stoff: In der Chemie wird der Begriff „Stoff“ im Allgemeinen verwendet, um die unterschiedlichen Erscheinungsformen der Materie zu subsumieren (Schröter et al. 1987). Er umfasst damit Elemente, Verbindungen, Metalle und Salze.

Verbindungen: Verbindungen sind der Zusammenschluss von Elementen durch unterschiedliche Bindungsarten (ionisch, metallisch, kovalent = Verbindungen erster Ordnung bzw. in Komplexen als Mischformen der Bindungsarten = Verbindungen höherer Ordnung). Es gibt organische Verbindungen und anorganische Verbindungen sowie Mischformen derselben (zumeist in Komplexen, Salzen der organischen Verbindungen).

Wafer: Als *Wafer* (engl. für „Waffel“ oder „Oblate“) werden in der Mikroelektronik, Photovoltaik und Mikrosystemtechnik kreisrunde oder quadratische, ca. 1 mm dicke Scheiben bezeichnet. Sie werden aus ein- oder polykristallinen (Halbleiter-)Rohlingen, sogenannten Ingots, hergestellt und dienen in der Regel als Substrat (Grundplatte) für elektronische Bauelemente, unter anderem für integrierte Schaltkreise (IC, *Chip*), mikromechanische Bauelemente oder photoelektrische Beschichtungen.

9 Referenzen

- Bachmann, G./ Grimm, V. / Hoffknecht, A. / Luther, W. / Ploetz, C./ Reuscher, G. / Teichert, O. / Zweck, A. (2007): Nanotechnologien für den Umweltschutz. VDI Technologiezentrum GmbH; Düsseldorf
- Behrendt, S. / Kreibich, R. / Lundie, S. / Pfitzner, R. / Scharp M (1998): Ökobilanzierung komplexer Elektronikprodukte; Berlin, Heidelberg, New York: Springer-Verlag
- BGR [Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe] (2005): Rohstoffwirtschaftliche Steckbriefe für Metalle und Nichtmetallrohstoffe; Hannover
- Bleischwitz, R. (2006): Internationale Rohstoffmärkte: steigende Preise, wachsendes Konfliktpotential, und neue Formen von Governance; in: Debiel, T. et al. (Ed.): Globale Trends 2007. Jahrbuch der Stiftung Entwicklung und Frieden, 305-321
- BMWA [Bundesministerium für Wirtschaft und Arbeit] (2005): Bericht zur aktuellen rohstoffwirtschaftlichen Situation und zu möglichen rohstoffpolitischen Handlungsoptionen; Berlin
- BMWi [Bundesministeriums für Wirtschaft und Technologie] (1999): Auswirkungen der weltweiten Konzentrierung in der Bergbauproduktion auf die Rohstoffversorgung in der deutschen Wirtschaft. Kurzfassung. Bericht Nr. 463; Berlin
- BMWi [Bundesministeriums für Wirtschaft und Technologie] (2005): Trends der Angebots- und Nachfragesituation bei mineralischen Rohstoffen. Endbericht zum Forschungsprojekt Nr. 09/05 des BMWi
- Bringezu, S. / van de Sand, I. / Schütz, H. / Bleischwitz, R. / Moll, S. (2009): Analysing global resource use of national and regional economies across various levels; in: Bringezu, S. / Bleischwitz, R. (Eds.): Sustainable Resource Management, 10-51
- BUWAL [Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft] (Ed.) (2004): Metallische und nichtmetallische Stoffe im Elektronikschrott: Stoffflussanalyse. Umweltgefährdende Stoffe. Schriftenreihe Umwelt Nr. 374
- EC [European Commission] (2008): Commission Staff Working Document accompanying the Communication from the Commission to the European Parliament and the Council: The Raw Materials Initiative – Meeting our Critical Needs for Growth and Jobs in Europe
- Elektro (o.J.): Lexikon; <http://www.elektro.de/lexikon.php> (Oktober 2006, Mai 2008)
- Elko (o.J.): Elektronik-Kompendium; <http://www.elektronik-kompendium.de> (Oktober 2006, Mai 2008)

- Enquete-Kommission [Enquete-Kommission „Schutz des Menschen und der Umwelt“ des Deutschen Bundestages] (1994): Die Industriegesellschaft gestalten; Bonn: Economica Verlag
- FAZ [Frankfurter Allgemeine Zeitung] (2004): Marktmanipulation – Die Gebrüder Hunt verzaubern sich am Silbermarkt. Artikel vom 24.02.2004;
<http://www.faz.net/s/Rub4B891837ECD14082816D9E088A2D7CB4/Doc~E6218B9BD7CC74781AA7C5014A314D7F5~ATpl~Ecommon~Scontent.html>
(FAZ.net) (Oktober 2006)
- Hagelücken, C. (2007): Eco-efficient Metals Recovery from Mobile Phones. Umicore, Hoboken, Belgium
- Hoppe, A. (o.J.): Periodensystem der Elemente; <http://www.periodensystem.info>
(Oktober 2011)
- Lenntech (2008): Lenntech Periodic Chart of Elements;
<http://www.Lenntech.com/deutsch/PSE.htm> (April 2008)
- Luther, W. / Zweck, A. (2006): Anwendungen der Nanotechnologie in Architektur und Bauwesen. Ergebnisse der Fachtagung Zukünftige Technologien, VDI Technologiezentrum; Düsseldorf
- Luther, W. (2007): Der Einsatz von Nanotechnologie in Architektur und Bauwesen. Hessisches Ministerium für Wirtschaft, Verkehr und Landesentwicklung; Wiesbaden
- Matthes, F. / Ziesing, H.-J. (2005): Sicherheit der Rohstoffversorgung – eine politische Herausforderung. Kurzstudie für die Bundestagsfraktion Bündnis 90/Grünen; Berlin
- NRC [National Research Council] (2008): Minerals, Critical Minerals, and the U.S. Economy. National Research Council of the National Academies, Division on Earth and Life Studies, Board on Earth Sciences and Resources, Committee on Critical Mineral Impacts on the U. S. Economy and Committee on Earth Resources; Washington, D.C.: The National Academies Press
- OECD [Organisation for Economic Cooperation and Development] (2008): Measuring Material Flows and Resource Productivity: The OECD Guide; Paris
- Reynolds, D. B. (1999): The Mineral Economy: How Prices and Costs can Falsely Signal Decreasing Scarcity. *Ecological Economics*, Vol. 31, Nr. 1: 155-166
- Ruby: Lanthanoide. Vorlesung an der Universität Freiburg;
http://ruby.chemie.uni-freiburg.de/Vorlesung/metalle_7_1.html (Oktober 2006).
- Rutherford (2006): Lexikon der Elemente;
http://www.uniterria.de/rutherford/tab_hauf.htm (Oktober 2006, Juni 2008)
- Schulmeister, S. (2008): Spekulanten machen das Öl teuer. taz vom 20.06.2008

- Schulmeister, S. / Schratzenstaller, M. / Picek, O. (2008): A General Financial Transaction Tax – Motives, Revenues, Feasibility and Effects. Österreichisches Institut für Wirtschaftsforschung, Wien; <http://www.wifo.ac.at> (Juni 2008)
- Schütz, H. / Bringezu S. (2008): Ressourcenverbrauch von Deutschland – aktuelle Kennzahlen und Begriffsbestimmungen. Erstellung eines Glossars zum „Ressourcenbegriff“ und Berechnung von fehlenden Kennzahlen des Ressourcenverbrauchs für die weitere politische Analyse. Umweltbundesamt (Ed.), Texte 02/08
- Soldera, M. (1995): Öko-Computer: Vergleich eines Öko-PC mit einem herkömmlichen PC anhand von LCA. Projektarbeit an der Ingenieurschule Chur
- Spiegel (2008): Kleine Teilchen, großes Risiko. Spiegel Nr. 24/2008; Hamburg: 148-150
- Tilton, J. E. (2003): On Borrowed Time? Assessing the Threat of Mineral Depletion. *Resources for the Future*
- USGS (2002/2004): Historical Statistics for Mineral and Material Commodities in the United States – Commodity Data for Selenium (2004), Tantalum (2002), Indium (2004), Columbinum (2002) and Rare Earth (2004); U.S. Geological Survey, Washington D.C.; <http://minerals.usgs.gov/ds/2005/140> (Oktober 2006)
- USGS (2008): Mineral Commodities (diverse Metalle); <http://minerals.usgs.gov/minerals> (April 2008)

10 Anhang

10.1 Anhang 1 – Produktions- und Reservenmengen der Metalle

Die folgenden Tabellen zeigen für jedes Metall bzw. jede Metallgruppe eine Übersicht über die Produktionsmengen, die Reserven und die Reservenbasis. Zusätzlich wird der relative Anteil der Länder an der globalen Produktion für das Jahr 2007 und an den globalen Reserven ausgewiesen. Neben den Produktionszahlen für 2007 wird zur Veranschaulichung der Volatilität diejenigen für 2006 aufgeführt (Tab. 10-1). Alle Angaben sind in Tonnen, soweit nicht anders angegeben.

Die Daten zu den Produktionsmengen sind den Mineral Commodity Summaries des U. S. Geological Surveys, entnommen; für das Jahr 2007 sind Schätzungen angegeben. Wo nicht verfügbar wurde auf andere Quellen zurückgegriffen (Lenntech, Rutherford, Ruby), wobei es sich im Allgemeinen auch hier um Schätzungen handelt. Die Zellen mit Daten aus solchen anderen Quellen sind hellgrau markiert.

Wo die Mengenangaben sich auf Mineralien bzw. chemische Verbindungen beziehen, (z.B. bei den Seltenen Erden, Bariumsulfat, Calciumoxid, Titanoxid, Hafniumoxid), wurden die Daten zur Produktions- bzw. der Reservenmenge auf den Metallgehalt umgerechnet. Dies wurde aus methodischen Gründen auch für jene Metalle durchgeführt, welche tatsächlich in Form von Verbindungen genutzt werden (z.B. Titanoxid und Calciumoxid).

Tab. 10-1: Produktion und Reserven von Metallen: Tabellen pro Metall nach Ländern

Aluminium / Bauxit	Produktion 2006	Produktion 2007	Anteil an Weltproduk- tion 2007	Reserven	Anteil an Welt- reserven	Reserven- basis
	[t], sofern nicht anders angegeben					
Australien	62.300.000	64.000.000	34 %	5.800.000.000	23 %	7.900.000.000
China	21.000.000	32.000.000	17 %	700.000.000	3 %	2.300.000.000
Brasilien	21.000.000	24.000.000	13 %	1.900.000.000	8 %	2.500.000.000
Guinea	14.500.000	14.000.000	7 %	7.400.000.000	30 %	8.600.000.000
Indien	12.700.000	13.000.000	7 %	770.000.000	3 %	1.400.000.000
Jamaika	14.900.000	14.000.000	7 %	2.000.000.000	8 %	2.500.000.000
Kasachstan	4.800.000	4.900.000	3 %	360.000.000	1 %	450.000.000
Russland	6.600.000	6.000.000	3 %	200.000.000	1 %	250.000.000
Surinam	4.920.000	5.000.000	3 %	580.000.000	2 %	600.000.000
Venezuela	5.500.000	5.500.000	3 %	320.000.000	1 %	350.000.000
Griechenland	2.450.000	2.400.000	1 %	600.000.000	2 %	650.000.000
Guyana	1.400.000	2.000.000	1 %	700.000.000	3 %	900.000.000
USA	N/A	N/A	N/A	20.000.000	0 %	40.000.000
andere Länder	5.460.000	6.800.000	4 %	3.400.000.000	14 %	4.000.000.000
Welt gesamt	178.000.000	190.000.000	100 %	5.000.000.000	100 %	32.000.000.000

Anmerkung: Werte für die Bergbauproduktion. Für 2007 sind die Werte geschätzt.

Aluminium / Metall	Produktion 2006	Produktion 2007	Anteil an Weltproduk- tion 2007	Reserven	Anteil an Welt- reserven	Reserven- basis
	[t], sofern nicht anders angegeben					
China	9.350.000	12.000.000	32 %			
Russland	3.720.000	4.200.000	11 %			
Kanada	3.050.000	3.100.000	8 %			
USA	2.284.000	2.600.000	7 %			
Australien	1.930.000	1.900.000	5 %			
Brasilien	1.498.000	1.700.000	4 %			
Indien	1.100.000	1.400.000	4 %			
Norwegen	1.330.000	1.100.000	3 %			
Südafrika	895.000	900.000	2 %			
Vereinigte Arabische Emirate, Dubai	730.000	900.000	2 %			
Bahrain	872.000	870.000	2 %			
Venezuela	610.000	630.000	2 %			
Mosambik	564.000	560.000	1 %			
Deutschland	537.000	520.000	1 %			
Tadschikistan	414.000	500.000	1 %			
Island	320.000	400.000	1 %			
andere Länder	4.510.000	4.500.000	12 %			
Welt gesamt	33.700.000	38.000.000	100 %			

Anmerkung: Werte für die Aluminiumschmelzelektrolyse. Für 2007 sind die Werte geschätzt.

Antimon	Produktion 2006	Produktion 2007	Anteil an Weltproduk- tion 2007	Reserven	Anteil an Welt- reserven	Reserven- basis
	[t], sofern nicht anders angegeben					
China	110.000	110.000	81 %	790.000	38 %	2.400.000
Bolivien	6.600	7.000	5 %	310.000	15 %	320.000
Südafrika	6.000	6.000	4 %	44.000	2 %	200.000
Russland (abbauwürdig)	3.500	4.000	3 %	350.000	17 %	370.000
Tadschikistan	2.000	2.000	1 %	50.000	2 %	150.000
Thailand	940	1.500	1 %	420.000	20 %	450.000
Guatemala	1.000	1.000	1 %	N/A		N/A
USA	—	—		—		90.000
andere Länder	4.000	4.000	3 %	150.000	7 %	330.000
Welt gesamt	134.000	135.000	100 %	2.100.000	100 %	4.300.000

Anmerkung: Werte für die Bergbauproduktion. Die Produktionsdaten für 2007 sind geschätzt.

Arsen / Arsentrioxid	Produktion 2006	Produktion 2007	Anteil an Weltproduk- tion 2007	Reserven	Anteil an Welt- reserven	Reserven- basis
	[t], sofern nicht anders angegeben					
China	30.000	30.000	51 %			
Chile	11.800	11.500	19 %			
Marokko	6.900	6.900	12 %			
Peru	3.500	3.500	6 %			
Kasachstan	1.500	1.500	3 %			
Russland	1.500	1.500	3 %			
Mexiko	1.750	1.400	2 %			
Belgien	1.000	1.000	2 %			
France	1.000	1.000	2 %			
andere Länder	800	1.000	2 %			
Welt gesamt	59.800	59.000	100 %			

Anmerkung: Die Werte beziehen sich auf die Produktion von Arsentrioxid. Die Produktionsdaten für 2007 sind geschätzt. Die Reserven und Reservenbasis sind vermutlich 20- bzw. 30-mal so hoch wie die jährliche Weltproduktion. Die Reservenbasis der Vereinigten Staaten wird auf 80.000 t geschätzt. Keine anderen länderspezifischen Daten vorhanden.

Barium / Bariumsulfat	Produktion 2006	Produktion 2007	Anteil an Weltproduk- tion 2007	Reserven	Anteil an Welt- reserven	Reserven- basis
	[t], sofern nicht anders angegeben					
China	4.400.000	4.400.000	55 %	62.000.000	33 %	360.000.000
Indien	950.000	1.000.000	13 %	53.000.000	28 %	80.000.000
Marokko	350.000	600.000	8 %	10.000.000	5 %	11.000.000
USA	589.000	540.000	7 %	15.000.000	8 %	45.000.000
Iran	290.000	250.000	3 %	N/A		N/A
Mexiko	206.000	250.000	3 %	7.000.000	4 %	8.500.000
Türkei	180.000	160.000	2 %	4.000.000	2 %	20.000.000
Kasachstan	120.000	120.000	2 %	N/A		150.000.000
Vietnam	120.000	120.000	2 %	N/A		N/A
Deutschland	90.000	85.000	1 %	1.000.000	1 %	1.500.000
Bulgarien	80.000	80.000	1 %	N/A		N/A
Russland	63.000	65.000	1 %	2.000.000	1 %	3.000.000
Algerien	53.000	60.000	1 %	9.000.000	5 %	15.000.000
Brasilien	50.000	50.000	1 %	2.100.000	1 %	5.000.000
United Kingdom	50.000	50.000	1 %	100.000	0 %	600.000
Thailand	120.000	5.000	0 %	9.000.000	5 %	15.000.000
France	30.000	N/A	N/A	2.000.000	1 %	2.500.000
andere Länder	220.000	210.000	3 %	14.000.000	7 %	160.000.000
Welt gesamt	7.960.000	8.000.000	100 %	190.000.000	100 %	880.000.000

Anmerkung: Werte für Kasachstan und Produktionsdaten 2007 geschätzt. Die Werte beziehen sich auf die Bergbauproduktion.

Beryllium	Produktion 2006	Produktion 2007	Anteil an Weltproduk- tion 2007	Reserven	Anteil an Welt- reserven	Reserven- basis
	[t], sofern nicht anders angegeben					
USA	155	100	77 %			
China	20	20	15 %			
Mosambik	6	6	5 %			
andere Länder	N/A	N/A	N/A			
Welt gesamt	180	130	100 %			

Anmerkung: Werte für die Bergbauproduktion sind geschätzt. Die Produktion in anderen Ländern (x) ist gemäß USGS 2008 weniger als eine halbe Einheit. Es sind keine genauen Angaben zu Reserven und Reservenbasis verfügbar.

Bismut	Produktion 2006	Produktion 2007	Anteil an Weltproduk- tion 2007	Reserven	Anteil an Welt- reserven	Reserven- basis
	[t], sofern nicht anders angegeben					
China	3.000	3.000	53 %	240.000	75 %	470.000
Mexiko	1.180	1.200	21 %	10.000	3 %	20.000
Peru	950	960	17 %	11.000	3 %	42.000
Kanada	190	190	3 %	5.000	2 %	30.000
Kasachstan	140	140	2 %	5.000	2 %	10.000
Bolivien	70	70	1 %	10.000	3 %	20.000
USA	-	-		14.000	4 %	
andere Länder	170	160	3 %	39.000	12 %	74.000
Welt gesamt	5.700	5.700	100 %	320.000	100 %	680.000

Anmerkung: Werte für die Bergbauproduktion und 2007 geschätzt.

Blei	Produktion 2006	Produktion 2007	Anteil an Weltproduk- tion 2007	Reserven	Anteil an Welt- reserven	Reserven- basis
	[t], sofern nicht anders angegeben					
China	1.200.000	1.320.000	37 %	11.000.000	14 %	36.000.000
Australien	686.000	640.000	18 %	24.000.000	30 %	59.000.000
USA	429.000	430.000	12 %	7.700.000	10 %	19.000.000
Peru	313.000	330.000	9 %	3.500.000	4 %	4.000.000
Mexiko	120.000	110.000	3 %	1.500.000	2 %	2.000.000
Kanada	82.000	75.000	2 %	400.000	1 %	5.000.000
Indien	67.000	75.000	2 %	N/A		N/A
Schweden	77.000	75.000	2 %	500.000	1 %	1.000.000
Irland	62.000	55.000	2 %	N/A		N/A
Kasachstan	48.000	50.000	1 %	5.000.000	6 %	7.000.000
Polen	51.000	50.000	1 %	N/A		5.400.000
Marokko	45.000	45.000	1 %	500.000	1 %	1.000.000
Südafrika	48.000	45.000	1 %	400.000	1 %	700.000
andere Länder	240.000	250.000	7 %	24.000.000	30 %	30.000.000
Welt gesamt	3.470.000	3.550.000	100 %	79.000.000	100 %	170.000.000

Anmerkung: Werte für die Bergbauproduktion und 2007 geschätzt.

Cadmium	Produktion 2006	Produktion 2007	Anteil an Weltproduk- tion 2007	Reserven	Anteil an Welt- reserven	Reserven- basis
Südkorea	3.250	3.600	18 %	—		—
China	3.000	3.400	17 %	99.000	20 %	280.000
Kanada	1.710	2.100	11 %	23.000	5 %	84.000
Japan	2.290	2.100	11 %	—		—
Kasachstan	2.000	2.000	10 %	41.000	8 %	89.000
Mexiko	1.400	1.600	8 %	21.000	4 %	39.000
Russland	1.100	1.210	6 %	12.000	2 %	37.000
Deutschland	640	640	3 %	—		8.000
Niederlande	570	570	3 %	—		—
Indien	450	500	3 %	21.000	4 %	49.000
Peru	420	420	2 %	54.000	11 %	87.000
Australien	400	390	2 %	66.000	13 %	260.000
USA	700	W		43.000	9 %	67.000
andere Länder	1.370	1.370	7 %	110.000	22 %	200.000
Welt gesamt	19.300	19.900	100 %	490.000	100 %	1.200.000

Anmerkung: Werte für die Raffinadeproduktion und 2007 geschätzt. Werte für die amerikanische Produktion 2007 aufgrund von Datenschutz nicht veröffentlicht.

Calcium / Calciumoxid	Produktion 2006	Produktion 2007	Anteil an Weltproduktion 2007	Reserven	Anteil an Weltreserven	Reservenbasis
	[t], sofern nicht anders angegeben					
China	160.000.000	170.000.000	61 %			
USA	21.000.000	20.200.000	7 %			
Japan(nur gebrannter Kalk)	8.900.000	8.900.000	3 %			
Russland	8.200.000	8.500.000	3 %			
Deutschland	7.000.000	7.000.000	3 %			
Brasilien	6.900.000	6.900.000	2 %			
Mexiko	5.700.000	5.800.000	2 %			
Italien ⁹	4.800.000	4.800.000	2 %			
Türkei (Verkäufe)	3.600.000	3.400.000	1 %			
France	3.500.000	3.000.000	1 %			
Bulgarien	2.500.000	2.500.000	1 %			
Kanada	2.410.000	2.500.000	1 %			
Iran	2.500.000	2.500.000	1 %			
Belgien	2.400.000	2.400.000	1 %			
Österreich	2.000.000	2.000.000	1 %			
Rumänien	2.000.000	2.000.000	1 %			
United Kingdom	2.000.000	2.000.000	1 %			
Polen	2.000.000	1.800.000	1 %			
Südafrika (Verkäufe)	1.600.000	1.600.000	1 %			
andere Länder	22.000.000	19.000.000	7 %			
Welt gesamt	271.000.000	277.000.000	100 %			

Anmerkung: Werte für die weltweite Kalkproduktion (CaO), Werte für 2007 geschätzt. Die Reserven werden von USGS als vollkommen ausreichend für alle in der Tabelle genannten Länder bezeichnet.

Cäsium: Cäsium wird nicht frei gehandelt, weshalb auch keine Produktionsdaten vorliegen. Vermutlich wird Cäsium speziell für einzelne Anwender wie z.B. die Erdölindustrie hergestellt. Es wird vor allem aus Pollucite (Aluminiumsilikat) gewonnen. Die Reserven werden auf ca. 70.000 t geschätzt.

Chrom	Produktion 2006	Produktion 2007	Anteil an Weltproduk- tion 2007	Reserven	Anteil an Welt- reserven	Reserven- basis
	[t], sofern nicht anders angegeben					
USA	-	-		110.000	0 %	120.000
Südafrika	7.418.000	7.500.000	38 %	160.000.000	34 %	270.000.000
Indien	3.600.000	3.600.000	18 %	25.000.000	5 %	57.000.000
Kasachstan	3.600.000	3.600.000	18 %	290.000.000	61 %	470.000.000
andere Länder	4.970.000	5.000.000	25 %	N/A		N/A
Welt gesamt	19.600.000	20.000.000	100 %	475.110.000	100 %	N/A

Anmerkung: Werte für die Bergbauproduktion und 2007 geschätzt. Daten zur Produktion in den Vereinigten Staaten 2007 wurden aufgrund von Datenrestriktionen nicht veröffentlicht. Die Angaben der Länderanteile sowie des Eintrags „Welt gesamt“ beziehen sich auf die Summe der vorliegenden Daten. Diese sind jedoch nicht vollständig.

Cobalt	Produktion 2006	Produktion 2007	Anteil an Weltproduk- tion 2007	Reserven	Anteil an Welt- reserven	Reserven- basis
	[t], sofern nicht anders angegeben					
USA	—	—		33.000	0 %	860.000
Kongo (Kinshasa)	28.000	22.500	36 %	3.400.000	49 %	4.700.000
Kanada	7.000	8.000	13 %	120.000	2 %	350.000
Australien	7.400	7.500	12 %	1.400.000	20 %	1.700.000
Sambia	8.000	7.000	11 %	270.000	4 %	680.000
Russland	5.100	5.000	8 %	250.000	4 %	350.000
Kuba	3.800	4.000	6 %	1.000.000	14 %	1.800.000
China	2.300	2.300	4 %	72.000	1 %	470.000
Frankreich (Neukaledonien)	1.900	2.000	3 %	230.000	3 %	860.000
Marokko	1.500	1.500	2 %	20.000	0 %	N/A
Brasilien	1.200	1.200	2 %	29.000	0 %	40.000
andere Länder	1.300	1.300	2 %	130.000	2 %	1.100.000
Welt gesamt	67.500	62.300	100 %	7.000.000	100 %	13.000.000

Anmerkung: Werte für die Bergbauproduktion und 2007 geschätzt. Aufgrund seiner Staatszugehörigkeit wurde Neukaledonien unter dem Eintrag Frankreich aufgeführt.

Eisen / Eisenerz	Produktion 2006	Produktion 2007	Anteil an Weltprod. 2007	Reserven	Anteil an Welt- reserven	Reserven- basis
[t], sofern nicht anders angegeben						
China	588.000.000	600.000.000	32 %	7.000.000.000	10 %	15.000.000.000
Brasilien	318.000.000	360.000.000	19 %	8.900.000.000	12 %	14.000.000.000
Australien	275.000.000	320.000.000	17 %	10.000.000.000	14 %	28.000.000.000
Indien	140.000.000	160.000.000	8 %	4.200.000.000	6 %	6.200.000.000
Russland	102.000.000	110.000.000	6 %	14.000.000.000	19 %	31.000.000.000
Ukraine	74.000.000	76.000.000	4 %	9.000.000.000	12 %	20.000.000.000
USA	53.000.000	52.000.000	3 %	2.100.000.000	3 %	4.600.000.000
Südafrika	41.000.000	40.000.000	2 %	650.000.000	1 %	1.500.000.000
Kanada	34.000.000	33.000.000	2 %	1.100.000.000	2 %	2.500.000.000
Schweden	23.000.000	24.000.000	1 %	2.200.000.000	3 %	5.000.000.000
Kasachstan	19.000.000	23.000.000	1 %	3.300.000.000	5 %	7.400.000.000
Iran	20.000.000	20.000.000	1 %	1.000.000.000	1 %	1.500.000.000
Venezuela	23.000.000	20.000.000	1 %	2.400.000.000	3 %	3.600.000.000
Mexiko	11.000.000	12.000.000	1 %	400.000.000	1 %	900.000.000
Mauretanien	11.000.000	11.000.000	1 %	400.000.000	1 %	1.000.000.000
andere Länder	67.000.000	70.000.000	4 %	6.200.000.000	8 %	17.000.000.000
Welt gesamt	1.800.000.000	1.900.000.000	100 %	73.000.000.000	100 %	60.000.000.000

Anmerkung: Die Werte beziehen sich auf die Bergbauproduktion und die Produktionswerte 2007 sind geschätzt. Die Angaben zu Reserven und Reservenbasis sind in Roheisen und Eisengehalt gegliedert. Die in der Tabelle angegebenen Reservedaten beziehen sich auf den Eisengehalt. Die Weltreserven von Roheisen belaufen sich auf 150.000.000.000 t und die Angaben zur Reservenbasis von Roheisen Welt gesamt sind 340.000.000.000 t.

Eisen / Roheisen	Produktion Roheisen 2006	Produktion Roheisen 2007	Anteil an Weltproduk- tion 2007	Reserven	Anteil an Welt- reserven	Reserven- basis
[t], sofern nicht anders angegeben						
China	404.000.000	465.000.000	49 %			
Japan	84.000.000	87.000.000	9 %			
Russland	52.000.000	50.000.000	5 %			
USA	38.000.000	36.000.000	4 %			
Ukraine	33.000.000	36.000.000	4 %			
Brasilien	35.000.000	35.000.000	4 %			
Deutschland	47.000.000	31.000.000	3 %			
Südkorea	28.000.000	30.000.000	3 %			
France	13.000.000	13.000.000	1 %			
Italien	12.000.000	11.000.000	1 %			
United Kingdom	11.000.000	11.000.000	1 %			
andere Länder	108.000.000	132.000.000	14 %			
Welt gesamt	865.000.000	940.000.000	100 %			

Anmerkung: Werte für 2007 sind geschätzt.

Eisen / Stahl	Produktion Stahl 2006	Produktion Stahl 2007	Anteil an Weltproduktion 2007	Reserven	Anteil an Weltreserven	Reservenbasis
	[t], sofern nicht anders angegeben					
China	419.000.000	482.000.000	37 %			
Japan	116.000.000	120.000.000	9 %			
Russland	71.000.000	70.000.000	5 %			
USA	98.000.000	98.000.000	7 %			
Ukraine	41.000.000	43.000.000	3 %			
Brasilien	33.000.000	32.000.000	2 %			
Deutschland	47.000.000	33.000.000	3 %			
Südkorea	48.000.000	51.000.000	4 %			
France	20.000.000	14.000.000	1 %			
Italien	32.000.000	21.000.000	2 %			
United Kingdom	14.000.000	10.000.000	1 %			
andere Länder	231.000.000	350.000.000	27 %			
Welt gesamt	1.170.000.000	1.320.000.000	100 %			

Anmerkung: Werte für 2007 geschätzt.

Gallium: Die wesentlichen Produzenten von Gallium sind China, Deutschland, Japan und die Ukraine. Kleinere Produzenten sind Ungarn, Kasachstan, Russland und Slowakei. Sie produzierten in 2007 ca. 80 t Gallium. Gallium wird vor allem als Beiprodukt aus Bauxit oder aus den Rückständen der Zinkerzaufbereitung gewonnen. Obwohl die Bauxitvorkommen sehr groß sind, kann Gallium nicht in großem Umfang aus Bauxit gewonnen werden. Hingegen wird Gallium in größerem Umfang aus Schrotten gewonnen. Beispielsweise hat Japan in 2006 8 t Gallium hergestellt und 90 t Gallium aus Schrott zurückgewonnen.

Germanium	Produktion 2006	Produktion 2007	Anteil an Weltproduktion 2007	Reserven	Anteil an Weltreserven	Reservenbasis
	[t], sofern nicht anders angegeben					
USA	4,5	4,6	5 %	N/A		N/A
andere Länder	85,5	95	95 %	450		500
Welt gesamt	90	100	100 %	N/A		N/A

Anmerkung: Werte für die Raffinerieproduktion und Produktionsdaten 2007 geschätzt.

Gold	Produktion 2006	Produktion 2007	Anteil an Weltproduk- tion 2007	Reserven	Anteil an Welt- reserven	Reserven- basis
	[t], sofern nicht anders angegeben					
Australien	244	280	11 %	5.000	12 %	6.000
Südafrika	272	270	11 %	6.000	14 %	36.000
China	245	250	10 %	1.200	3 %	4.100
USA	252	240	10 %	2.700	6 %	3.700
Peru	203	170	7 %	3.500	8 %	4.100
Russland	159	160	6 %	3.000	7 %	3.500
Indonesien	164	120	5 %	1.800	4 %	2.800
Kanada	104	100	4 %	1.300	3 %	3.500
andere Länder	818	920	37 %	17.000	40 %	26.000
Welt gesamt	2.460	2.500	100 %	42.000	100 %	90.000

Anmerkung: Werte für die Bergbauproduktion (Goldinhalt) und Produktionsdaten 2007 geschätzt. Die Rubrik „andere Länder“ umfasst nicht alle übrigen Länder, weswegen Datenlücken möglich sind.

Hafnium	Produktion 2006	Produktion 2007	Anteil an Weltproduk- tion 2007	Reserven	Anteil an Welt- reserven	Reserven- basis
	[t], sofern nicht anders angegeben					
USA				68.000	11 %	97.000
Australien				180.000	30 %	600.000
Brasilien				44.000	7 %	91.000
China				N/A		N/A
Indien				42.000	7 %	46.000
Südafrika				280.000	46 %	290.000
Ukraine				N/A		N/A
andere Länder				N/A		N/A
Welt gesamt				610.000	100 %	1.100.000

Anmerkung: Die Reservedaten beziehen sich auf HfO₂.

Indium	Produktion 2006	Produktion 2007	Anteil an Weltproduk- tion 2007	Reserven	Anteil an Welt- reserven	Reserven- basis
	[t], sofern nicht anders angegeben					
China	350	250	49 %	8.000	73 %	10.000
Südkorea	50	85	17 %	—		—
Kanada	50	50	10 %	150	1 %	560
Japan	55	50	10 %	—		—
Belgien	30	30	6 %	s. andere Länder		s. andere Länder
Russland	16	17	3 %	80	1 %	250
France	10	10	2 %	s. andere Länder		s. andere Länder
Peru	6	6	1 %	360	3 %	580
USA	—	—		280	3 %	450
andere Länder	15	15	3 %	1.800	16 %	4.200
Welt gesamt	580	510	100 %	11.000	100 %	16.000

Anmerkung: Die Werte der Raffinerieproduktion und Produktionsdaten sind für 2007 geschätzt. China hat erstmalig seine Reserven und Reservebasis in 2008 ausgewiesen.

Kalium/ Kaliumoxid	Produktion 2006	Produktion 2007	Anteil an Weltproduk- tion 2007	Reserven	Anteil an Welt- reserven	Reserven- basis
	[t], sofern nicht anders angegeben					
Kanada	8.360.000	11.000.000	33 %	4.400.000.000	53 %	11.000.000.000
Russland	5.720.000	6.300.000	19 %	1.800.000.000	22 %	2.200.000.000
Belarus	4.605.000	5.400.000	16 %	750.000.000	9 %	1.000.000.000
Deutschland	3.620.000	3.700.000	11 %	710.000.000	9 %	850.000.000
Israel	2.200.000	2.000.000	6 %	40.000.000	0 %	580.000.000
USA	1.100.000	1.200.000	4 %	90.000.000	1 %	300.000.000
Jordan	1.036.000	1.100.000	3 %	40.000.000	0 %	580.000.000
China	600.000	700.000	2 %	8.000.000	0 %	450.000.000
Chile	450.000	450.000	1 %	10.000.000	0 %	50.000.000
Spanien	437.000	450.000	1 %	20.000.000	0 %	35.000.000
United Kingdom	480.000	450.000	1 %	22.000.000	0 %	30.000.000
Brasilien	405.000	410.000	1 %	300.000.000	4 %	600.000.000
Ukraine	65.000	65.000	0 %	25.000.000	0 %	30.000.000
andere Länder	—	—		50.000.000	1 %	140.000.000
Welt gesamt	29.100.000	33.000.000	100 %	8.300.000.000	100 %	18.000.000.000

Anmerkung: Die Werte sind für K₂O angegeben. Die Werte beziehen sich auf die Bergbauproduktion und die Produktionsdaten 2007 sind geschätzt. Die Reserven im Toten Meer sind jeweils zur Hälfte auf Israel und Jordanien verteilt. Die US-amerikanischen Daten sind auf Grund von Datenschutzgründen ungenau.

Kupfer	Produktion 2006	Produktion 2007	Anteil an Weltproduk- tion 2007	Reserven	Anteil an Welt- reserven	Reserven- basis
	[t], sofern nicht anders angegeben					
Chile	5.360.000	5.700.000	37 %	150.000.000	31 %	360.000.000
Peru	1.049.000	1.200.000	8 %	30.000.000	6 %	60.000.000
USA	1.200.000	1.190.000	8 %	35.000.000	7 %	70.000.000
China	890.000	920.000	6 %	26.000.000	5 %	63.000.000
Australien	859.000	860.000	6 %	24.000.000	5 %	43.000.000
Indonesien	816.000	780.000	5 %	35.000.000	7 %	38.000.000
Russland	725.000	730.000	5 %	20.000.000	4 %	30.000.000
Kanada	607.000	585.000	4 %	9.000.000	2 %	20.000.000
Sambia	476.000	530.000	3 %	19.000.000	4 %	35.000.000
Polen	512.000	470.000	3 %	30.000.000	6 %	48.000.000
Kasachstan	457.000	460.000	3 %	14.000.000	3 %	20.000.000
Mexiko	338.000	400.000	3 %	30.000.000	6 %	40.000.000
andere Länder	1.835.000	1.800.000	12 %	65.000.000	13 %	110.000.000
Welt gesamt	15.100.000	15.600.000	100 %	490.000.000	100 %	940.000.000

Anmerkung: Die Werte beziehen sich auf die Bergbauproduktion und die Produktionsdaten 2007 sind geschätzt.

Lithium	Produktion 2006	Produktion 2007	Anteil an Weltproduk- tion 2007	Reserven	Anteil an Welt- reserven	Reserven- basis
	[t], sofern nicht anders angegeben					
Chile	8.200	9.400	38 %	3.000.000	73 %	3.000.000
Australien	5.500	5.500	22 %	160.000	4 %	260.000
Argentinien	2.900	3.000	12 %	N/A		N/A
China	2.820	3.000	12 %	540.000	13 %	1.100.000
Russland	2.200	2.200	9 %	N/A		N/A
Kanada	707	710	3 %	180.000	4 %	360.000
Zimbabwe	600	600	2 %	23.000	1 %	27.000
Portugal	320	320	1 %	N/A		N/A
Brasilien	242	240	1 %	190.000	5 %	910.000
USA	W	W		38.000	1 %	410.000
Bolivien	—	—		—		5.400.000
Welt gesamt	23.500	25.000	100 %	4.100.000	100 %	11.000.000

Anmerkung: Die Werte beziehen sich auf den Metallgehalt in der Bergbauproduktion. Die Produktionsdaten sind für 2007. Die Angaben für die Weltproduktion enthalten nicht die US-amerikanischen Produktionsdaten. Die Angaben für die US-amerikanischen Daten fehlen aus Datenschutzgründen. Alle Angaben für Argentinien und Australien sind geschätzt. Die Werte beziehen sich.

Magnesium / Magnesit	Produktion 2006	Produktion 2007	Anteil an Weltproduk- tion 2007	Reserven	Anteil an Welt- reserven	Reserven- basis
	[t], sofern nicht anders angegeben					
China	1.370.000	1.870.000	41 %	380.000.000	17 %	860.000.000
Türkei	922.000	930.000	20 %	65.000.000	3 %	160.000.000
Nordkorea	345.000	350.000	8 %	450.000.000	20 %	750.000.000
Russland	346.000	350.000	8 %	650.000.000	30 %	730.000.000
Österreich	202.000	200.000	4 %	15.000.000	1 %	20.000.000
Griechenland	144.000	150.000	3 %	30.000.000	1 %	30.000.000
Spanien	144.000	150.000	3 %	10.000.000	0 %	30.000.000
Australien	137.000	140.000	3 %	100.000.000	5 %	120.000.000
Slowakei	115.000	115.000	3 %	45.000.000	2 %	320.000.000
Brasilien	111.000	110.000	2 %	45.000.000	2 %	65.000.000
Indien	107.000	105.000	2 %	14.000.000	1 %	55.000.000
USA	W	W		10.000.000	0 %	15.000.000
andere Länder	117.000	120.000	3 %	390.000.000	18 %	440.000.000
Welt gesamt	4.060.000	4.600.000	100 %	2.200.000.000	100 %	3.600.000.000

Anmerkung: Die Werte beziehen sich auf die Magnesitproduktion. Die Produktionsdaten sind für 2007 geschätzt. Die Angaben für die Weltproduktion enthalten nicht die US-amerikanischen Produktionsdaten. Die Angaben für die US-amerikanischen Daten fehlen aufgrund von Datenrestriktionen.

Mangan	Produktion 2006	Produktion 2007	Anteil an Weltproduk- tion 2007	Reserven	Anteil an Welt- reserven	Reserven- basis
	[t], sofern nicht anders angegeben					
Südafrika	2.300.000	2.300.000	20 %	100.000.000	22 %	4.000.000.000
Australien	2.190.000	2.200.000	19 %	62.000.000	13 %	160.000.000
China	1.600.000	1.600.000	14 %	40.000.000	9 %	100.000.000
Gabun	1.350.000	1.550.000	13 %	20.000.000	4 %	160.000.000
Brasilien	1.370.000	1.000.000	9 %	35.000.000	8 %	57.000.000
Ukraine	820.000	820.000	7 %	140.000.000	30 %	520.000.000
Indien	811.000	650.000	6 %	56.000.000	12 %	150.000.000
Mexiko	133.000	130.000	1 %	4.000.000	1 %	9.000.000
USA	—	—		—		—
andere Länder	1.360.000	1.360.000	12 %	gering		gering
Welt gesamt	11.900.000	11.600.000	100 %	460.000.000	100 %	5.200.000.000

Anmerkung: Die Werte beziehen sich auf die Bergbauproduktion. Die Produktionsdaten sind für 2007 geschätzt, ebenso die Produktionsdaten von China, Gabun, Indien, der Ukraine und der Weltproduktion für 2006. Die Daten der Reservenbasis von Mexiko und der Ukraine enthalten auch vermutete Ressourcen.

Molybdän	Produktion 2006	Produktion 2007	Anteil an Weltproduk- tion 2007	Reserven	Anteil an Welt- reserven	Reserven- basis
	[t], sofern nicht anders angegeben					
USA	59.800	59.400	32 %	2.700.000	31 %	5.400.000
China	43.900	46.000	25 %	3.300.000	38 %	8.300.000
Chile	43.278	41.100	22 %	1.100.000	13 %	2.500.000
Peru	17.209	17.500	9 %	140.000	2 %	230.000
Kanada	7.270	8.000	4 %	450.000	5 %	910.000
Mexiko	2.500	4.000	2 %	135.000	2 %	230.000
Russland	3.100	3.100	2 %	240.000	3 %	360.000
Armenien	3.000	3.000	2 %	200.000	2 %	400.000
Iran	2.000	2.500	1 %	50.000	1 %	140.000
Mongolei	1.200	1.500	1 %	30.000	0 %	50.000
Usbekistan	600	500	0 %	60.000	1 %	150.000
Kasachstan	250	400	0 %	130.000	2 %	200.000
Kirgisien	250	250	0 %	100.000	1 %	180.000
Welt gesamt	184.000	187.000	100 %	8.600.000	100 %	19.000.000

Anmerkung: Die Werte beziehen sich auf die Bergbauproduktion. Die Produktionsdaten sind für 2007 geschätzt. Die Daten für Russland und Usbekistan sind generell geschätzt.

Natrium / Natriumsulfat	Produktion 2006	Produktion 2007	Anteil an Weltproduk- tion 2007	Reserven	Anteil an Welt- reserven	Reserven- basis
	[t], sofern nicht anders angegeben					
USA				860.000.000	26 %	1.400.000.000
Kanada				84.000.000	3 %	270.000.000
Mexiko				170.000.000	5 %	230.000.000
Spanien				180.000.000	5 %	270.000.000
Türkei				100.000.000	3 %	N/A
andere Länder				1.900.000.000	58 %	2.400.000.000
Welt gesamt				3.300.000.000	100 %	4.600.000.000

Anmerkung: Die Angaben beziehen sich auf Natriumsulfate. Produktionsdaten sind nicht verfügbar.

Nickel	Produktion 2006	Produktion 2007	Anteil an Weltproduk- tion 2007	Reserven	Anteil an Welt- reserven	Reserven- basis
	[t], sofern nicht anders angegeben					
Russland	320.000	322.000	19 %	6.600.000	10 %	9.200.000
Kanada	233.000	258.000	16 %	4.900.000	7 %	15.000.000
Australien	185.000	180.000	11 %	24.000.000	36 %	27.000.000
Indonesien	140.000	145.000	9 %	3.200.000	5 %	13.000.000
Frankreich (Neukaledonien)	103.000	119.000	7 %	7.100.000	11 %	15.000.000
Kolumbien	94.100	99.500	6 %	830.000	1 %	1.100.000
Philippines	58.900	88.400	5 %	940.000	1 %	5.200.000
China	82.100	80.000	5 %	1.100.000	2 %	7.600.000
Kuba	75.000	77.000	5 %	5.600.000	8 %	23.000.000
Brasilien	82.500	75.300	5 %	4.500.000	7 %	8.300.000
Dominikanische Republik	46.500	47.000	3 %	720.000	1 %	1.000.000
Südafrika	41.600	42.000	3 %	3.700.000	6 %	12.000.000
Botswana	38.000	35.000	2 %	490.000	1 %	920.000
Griechenland	21.700	20.100	1 %	490.000	1 %	900.000
Venezuela	20.000	20.000	1 %	560.000	1 %	630.000
Zimbabwe	8.820	9.000	1 %	15.000	0 %	260.000
USA	—	—		—		150.000
andere Länder	34.300	41.000	2 %	2.100.000	3 %	5.900.000
Welt gesamt	1.580.000	1.660.000	100 %	67.000.000	100 %	150.000.000

Anmerkung: Die Werte beziehen sich auf die Bergbauproduktion. Die Produktionsdaten sind für 2007 geschätzt. Frankreich beinhaltet unter anderem die Produktion und Reserven von Neukaledonien.

Niob	Produktion 2006	Produktion 2007	Anteil an Weltproduk- tion 2007	Reserven	Anteil an Welt- reserven	Reserven- basis
	[t], sofern nicht anders angegeben					
Brasilien	40.000	40.000	89 %	2.600.000	96 %	2.600.000
Kanada	4.167	4.200	9 %	62.000	2 %	92.000
Australien	200	200	0 %	21.000	1 %	320.000
Ruanda	80	80	0 %	N/A		N/A
Nigeria	35	40	0 %	N/A		N/A
Mosambik	29	30	0 %	N/A		N/A
Äthiopien	11	10	0 %	N/A		N/A
USA	—	—		—		N/A
andere Länder	18	20	0 %	N/A		N/A
Welt gesamt	44.500	45.000	100 %	2.700.000	100 %	3.000.000

Anmerkung: Die Werte beziehen sich auf die Bergbauproduktion und die Produktionsdaten 2007 sind geschätzt.

Palladium	Produktion 2006	Produktion 2007	Anteil an Weltproduk- tion 2007	Reserven	Anteil an Welt- reserven	Reserven- basis
	[t], sofern nicht anders angegeben					
Russland	98,4	95	41 %	6.200	9 %	6.600
Südafrika	85	93	40 %	63.000	89 %	70.000
Kanada	14	18	8 %	310	0 %	390
USA	14,4	13,5	6 %	900	1 %	2.000
Zimbabwe	4	4,4	2 %		0 %	
Kolumbien	N/A	N/A			0 %	
andere Länder	8,21	8,1	3 %	800	1 %	850
Welt gesamt	224	232	100 %	71.000	100 %	80.000

Anmerkung: Die Werte beziehen sich auf die Bergbauproduktion und die Produktionsdaten 2007 sind geschätzt. Die Reservedaten beziehen sich auf die Platinmetallgruppe (PGM). Alle Angaben sind in Kilogramm. Die Reservedaten für Kolumbien und Zimbabwe sind in der Gruppe „andere Länder“ enthalten.

Platin	Produktion 2006	Produktion 2007	Anteil an Weltproduk- tion 2007	Reserven	Anteil an Welt- reserven	Reserven- basis
	[t], sofern nicht anders angegeben					
Südafrika	170	183	80 %	63.000	89 %	70.000
Russland	29	27	12 %	6.200	9 %	6.600
Kanada	9	8,5	4 %	310	0 %	390
Zimbabwe	5,1	5,4	2 %		0 %	
USA	4,29	3,4	1 %	900	1 %	2.000
Kolumbien	1,1	1,1	0 %		0 %	
andere Länder	2,19	1,5	1 %	800	1 %	850
Welt gesamt	221	230	100 %	71.000	100 %	80.000

Anmerkung: Die Werte beziehen sich auf die Bergbauproduktion und die Produktionsdaten 2007 sind geschätzt. Die Reservedaten beziehen sich auf die Platinmetallgruppe (PGM). Alle Angaben sind in Kilogramm. Die Reservedaten für Kolumbien und Zimbabwe sind in der Gruppe „andere Länder“ enthalten.

Quecksilber	Produktion 2006	Produktion 2007	Anteil an Weltproduk- tion 2007	Reserven	Anteil an Welt- reserven	Reserven- basis
	[t], sofern nicht anders angegeben					
China	1.100	1.100	73 %	—	—	—
Kirgisien	250	250	17 %	7.500	16 %	13.000
USA	N/A	N/A	—	—	—	7.000
Algerien	—	—	—	—	—	3.000
Italien	—	—	—	—	—	69.000
Spanien	—	—	—	—	—	90.000
andere Länder	125	150	10 %	38.000	83 %	61.000
Welt gesamt	1.480	1.500	100 %	46.000	100 %	240.000

Anmerkung: Die Werte beziehen sich auf die Bergbauproduktion und die Produktionsdaten 2007 sind geschätzt.

Rhenium	Produktion 2006	Produktion 2007	Anteil an Weltproduk- tion 2007	Reserven	Anteil an Welt- reserven	Reserven- basis
	[kg], sofern nicht anders angegeben					
Chile	19,8	22,9	46 %	1.300	52 %	2.500
Kasachstan	8	8	16 %	190	8 %	250
USA	8,1	7,3	15 %	390	16 %	4.500
Peru	5	5	10 %	45	2 %	550
Kanada	1,7	1,7	3 %	32	1 %	1.500
Russland	1,4	1,4	3 %	310	12 %	400
Armenien	1,2	1,2	2 %	95	4 %	120
andere Länder	2	2	4 %	91	4 %	360
Welt gesamt	47,2	49,5	100 %	2.500	100 %	10.000

Anmerkung: Angaben in Kilogramm. Die Werte beziehen sich auf die Bergbauproduktion und die Produktionsdaten beziehen sich auf die geschätzte Menge des Rheniums, das in Verbindung mit Kupfer und Molybdän wieder hergestellt wurde. Die Daten für Chile sind geschätzte Werte, die sich auf die Wiederherstellung von Röstresten von Belgien, Chile und Mexiko beziehen.

Selen	Produktion 2006	Produktion 2007	Anteil an Weltproduk- tion 2007	Reserven	Anteil an Welt- reserven	Reserven- basis
	[t], sofern nicht anders angegeben					
Japan	735	740	48 %	—		—
Kanada	300	300	19 %	6.000	7 %	10.000
Belgien	200	200	13 %	—		—
Chile	84	84	5 %	16.000	20 %	37.000
Philippines	65	65	4 %	2.000	2 %	3.000
Finnland	62	62	4 %	—		—
Peru	50	50	3 %	5.000	6 %	8.000
Schweden	20	20	1 %	—		—
Indien	13	13	1 %	—		—
Deutschland	12	12	1 %	—		—
USA	W	W		10.000	12 %	19.000
andere Länder	N/A	N/A		43.000	52 %	92.000
Welt gesamt	1.540	1.550	100 %	82.000	100 %	170.000

Anmerkung: Die Werte beziehen sich auf die Raffinerieproduktion und die Produktionsdaten 2007 sind geschätzt. Die Daten für die Weltgesamtproduktion enthalten keine Produktionsdaten der Vereinigten Staaten. Außer in den genannten Ländern wird raffiniertes Selen in Australien, China, Kasachstan, Russland und England produziert. Hierzu liegen jedoch keine Daten vor.

Seltene Erden	Produktion 2006	Produktion 2007	Anteil an Weltproduk- tion 2007	Reserven	Anteil an Welt- reserven	Reserven- basis
	[t], sofern nicht anders angegeben					
China	119.000	120.000	97 %	27.000.000	31 %	89.000.000
Indien	2.700	2.700	2 %	1.100.000	1 %	1.300.000
Brasilien	730	730	1 %	48.000	0 %	84.000
Malaysia	200	200	0 %	30.000	0 %	35.000
USA	—	—		13.000.000	15 %	14.000.000
Australien	—	—		5.200.000	6 %	5.800.000
Gemeinschaft Unabhängiger Staaten	N/A	N/A		19.000.000	22 %	21.000.000
Thailand	—	—		N/A		N/A
andere Länder	N/A	N/A		22.000.000	25 %	23.000.000
Welt gesamt	123.000	124.000	100 %	88.000.000	100 %	150.000.000

Anmerkung: Die Werte beziehen sich auf die Bergbauproduktion und die Produktionsdaten sind geschätzt.

Silber	Produktion 2006	Produktion 2007	Anteil an Weltproduk- tion 2007	Reserven	Anteil an Welt- reserven	Reserven- basis
	[t], sofern nicht anders angegeben					
Peru	3.470	3.400	17 %	36.000	13 %	37.000
Mexiko	2.700	3.000	15 %	37.000	14 %	40.000
China	2.600	2.700	13 %	26.000	10 %	120.000
Australien	1.727	2.000	10 %	31.000	11 %	37.000
Chile	1.600	1.400	7 %	N/A		N/A
Polen	1.300	1.300	6 %	51.000	19 %	140.000
USA	1.140	1.220	6 %	25.000	9 %	80.000
Kanada	980	1.200	6 %	16.000	6 %	35.000
Südafrika	87	90	0 %	N/A		N/A
andere Länder	4.600	4.200	20 %	50.000	19 %	80.000
Welt gesamt	20.200	20.500	100 %	270.000	100 %	570.000

Anmerkung: Die Werte beziehen sich auf die Bergbauproduktion und die Produktionsdaten 2007 sind geschätzt.

Strontium	Produktion 2006	Produktion 2007	Anteil an Weltproduk- tion 2007	Reserven	Anteil an Welt- reserven	Reserven- basis
	[t], sofern nicht anders angegeben					
Spanien	200.000	200.000	33 %			
China	180.000	190.000	32 %			
Mexiko	125.000	125.000	21 %			
Türkei	60.000	60.000	10 %			
Argentinien	7.500	7.500	1 %			
Iran	7.500	7.500	1 %			
Pakistan	1.900	3.500	1 %			
Marokko	2.700	2.700	0 %			
USA	—	—		—		1.400.000
Tadschikistan	N/A	N/A				
Welt gesamt	585.000	600.000	100 %	6.800.000		12.400.000

Anmerkung: Die Werte beziehen sich auf die Bergbauproduktion und die Produktionsdaten 2007 sind geschätzt. Die Daten für China sind geschätzt.

Tantal	Produktion 2006	Produktion 2007	Anteil an Weltproduk- tion 2007	Reserven	Anteil an Welt- reserven	Reserven- basis
	[t], sofern nicht anders angegeben					
Australien	850	850	61 %	40.000	31 %	84.000
Brasilien	250	250	18 %	88.000	68 %	90.000
Kanada	68	70	5 %	3.000	2 %	>3.000
Äthiopien	70	70	5 %	N/A		N/A
Mosambik	70	70	5 %	N/A		N/A
Ruanda	62	60	4 %	N/A		N/A
USA	—	—		—		unbedeutend
andere Länder	32	30	2 %	N/A		N/A
Welt gesamt	1.400	1.400	100 %	130.000	100 %	180.000

Anmerkung: Die Werte beziehen sich auf die Bergbauproduktion und die Produktionsdaten 2007 sind geschätzt. Die Produktionsdaten beinhalten nicht das Tantal, das in Zinn Absonderungen enthalten ist.

Tellur	Produktion 2006	Produktion 2007	Anteil an Weltproduk- tion 2007	Reserven	Anteil an Welt- reserven	Reserven- basis
	[t], sofern nicht anders angegeben					
Kanada	75	75	56 %	700	3 %	1.500
Peru	33	35	26 %	1.600	8 %	2.800
Japan	24	25	19 %	N/A		N/A
USA	W	W		3.000	14 %	6.000
andere Länder	N/A	N/A		16.000	76 %	37.000
Welt gesamt	132	135	100 %	21.000	100 %	47.000

Anmerkung: Die Werte beziehen sich auf die Raffinerieproduktion und die Produktionsdaten 2007 sind geschätzt. Die Reservedaten beinhalten Tellur, das in Kupfervorkommen enthalten ist. Außer in den genannten Ländern wird raffiniertes Tellur in Australien, Belgien, China, Deutschland, Kasachstan, auf den Philippinen und in Russland produziert. Hierzu liegen jedoch keine Daten vor. Die Weltgesamtproduktion beinhaltet keine US-amerikanischen Produktionsdaten.

Thallium	Produktion 2006	Produktion 2007	Anteil an Weltproduk- tion 2007	Reserven	Anteil an Welt- reserven	Reserven- basis
	[t], sofern nicht anders angegeben					
USA				32	8 %	120
andere Länder	10	10	100 %	350	92 %	530
Welt gesamt	10	10	100 %	380	100 %	650

Anmerkung: Die Werte beziehen sich auf die Bergbauproduktion und die Produktionsdaten 2007 sind geschätzt. Die Schätzungen basieren auf dem Thalliumgehalt von Zinkerzen. Es sind keine Angaben für die US-Produktion vorhanden, aber Flugstaub und Residuen von der Schmelze unedler Metalle aus denen Thalliummetalle und -verbindungen wiederhergestellt werden können, sind nach Kanada, Frankreich, England und in andere Länder exportiert worden.

Titan / Titandioxid	Produktion 2006	Produktion 2007	Anteil an Weltproduk- tion 2007	Reserven	Anteil an Welt- reserven	Reserven- basis
	[t], sofern nicht anders angegeben					
Australien	1.537.000	1.549.000	25 %	149.000.000	20 %	191.000.000
Südafrika	1.167.000	1.181.000	19 %	71.300.000	10 %	244.000.000
Kanada	791.000	816.000	13 %	31.000.000	4 %	36.000.000
China	500.000	500.000	8 %	200.000.000	27 %	350.000.000
Norwegen	380.000	380.000	6 %	37.000.000	5 %	60.000.000
Indien	331.000	358.000	6 %	92.400.000	13 %	230.000.000
Ukraine	330.000	337.000	6 %	8.400.000	1 %	15.500.000
USA	300.000	300.000	5 %	6.400.000	1 %	60.800.000
Vietnam	230.000	200.000	3 %	1.600.000	0 %	14.000.000
Brasilien	133.000	133.000	2 %	44.200.000	6 %	86.500.000
Mosambik	—	103.000	2 %	16.480.000	2 %	21.570.000
Sierra Leone	13.000	80.000	1 %	2.500.000	0 %	3.600.000
andere Länder	108.000	109.000	2 %	66.400.000	9 %	151.000.000
Welt gesamt	5.800.000	6.100.000	100 %	730.000.000	100 %	1.500.000.000

Anmerkung: Die Werte beziehen sich auf die Bergbauproduktion von Ilmenit und Rutil und die Produktionsdaten 2007 sind geschätzt. Die Bergbauproduktion in Kanada, Norwegen und Südafrika von Ilmenit dient vor allem der Herstellung von eisenhaltiger Titanasche.

Titan / Metall	Produktion 2006	Produktion 2007	Anteil an Weltproduk- tion 2007	Reserven	Anteil an Welt- reserven	Reserven- basis
	[t], sofern nicht anders angegeben					
Japan	37.800	39.000	28 %			
China	18.000	32.000	23 %			
Russland	32.000	32.000	23 %			
Kasachstan	23.000	25.000	18 %			
Ukraine	10.000	10.000	7 %			
USA	W	W				
Australien	—	—				
Belgien	—	—				
Kanada	—	—				
Finnland	—	—				
Frankreich	—	—				
Deutschland	—	—				
Italien	—	—				
Mexiko	—	—				
Spanien	—	—				
United Kingdom	—	—				
andere Länder	—	—				
Welt gesamt	121.000	138.000	100 %			

Anmerkung: Die Werte beziehen sich auf die Schwammproduktion und die Kapazitätsdaten sind geschätzt. Die Angaben für China, Kasachstan, Russland und die Ukraine sind geschätzt. Die Weltgesamtproduktionsdaten enthalten keine US-amerikanischen Produktionsdaten.

Vanadium	Produktion 2006	Produktion 2007	Anteil an Weltproduk- tion 2007	Reserven	Anteil an Welt- reserven	Reserven- basis
	[t], sofern nicht anders angegeben					
Südafrika	22.000	23.000	39 %	3.000.000	23 %	12.000.000
China	17.500	18.500	32 %	5.000.000	38 %	14.000.000
Russland	15.100	16.000	27 %	5.000.000	38 %	7.000.000
USA	—	—		45.000	0 %	4.000.000
andere Länder	1.100	1.100	2 %	N/A		1.000.000
Welt gesamt	55.700	58.600	100 %	13.000.000	100 %	38.000.000

Anmerkung: Die Werte beziehen sich auf die Bergbauproduktion und die Produktionsdaten 2007 sind geschätzt.

Wolfram	Produktion 2006	Produktion 2007	Anteil an Weltproduk- tion 2007	Reserven	Anteil an Welt- reserven	Reserven- basis
	[t], sofern nicht anders angegeben					
China	79.000	77.000	86 %	1.800.000	62 %	4.200.000
Russland	4.000	4.400	5 %	250.000	9 %	420.000
Kanada	2.560	2.600	3 %	260.000	9 %	490.000
Österreich	1.300	1.300	1 %	10.000	0 %	15.000
Bolivien	870	870	1 %	53.000	2 %	100.000
Portugal	780	800	1 %	4.700	0 %	62.000
Korea. North	600	600	1 %	N/A		35.000
USA	—	W		140.000	5 %	200.000
andere Länder	1.680	2.040	2 %	420.000	14 %	740.000
Welt gesamt	90.800	89.600	100 %	2.900.000	100 %	6.300.000

Anmerkung: Die Werte beziehen sich auf die Bergbauproduktion und die Produktionsdaten 2007 sind geschätzt.

Yttrium	Produktion 2006	Produktion 2007	Anteil an Weltproduk- tion 2007	Reserven	Anteil an Welt- reserven	Reserven- basis
	[t], sofern nicht anders angegeben					
China	8.800	8.800	99 %	220.000	41 %	240.000
Indien	55	55	1 %	72.000	13 %	80.000
Brasilien	15	15	0 %	2.200	0 %	6.200
Malaysia	4	4	0 %	13.000	2 %	21.000
USA	k.A.	k.A.	k.A.	120.000	22 %	130.000
Australien	k.A.	k.A.	k.A.	100.000	19 %	110.000
Sri Lanka	k.A.	k.A.	k.A.	240	0 %	260
andere Länder	k.A.	k.A.	k.A.	17.000	3 %	20.000
Welt gesamt	8.900	8.900	100 %	540.000	100 %	610.000

Anmerkung: Die Werte beziehen sich auf die Bergbauproduktion weltweit, die Produktionsdaten für 2007 sind geschätzt, Angaben für Y₂O₃

Zink	Produktion 2006	Produktion 2007	Anteil an Weltproduk- tion 2007	Reserven	Anteil an Welt- reserven	Reserven- basis
	[t], sofern nicht anders angegeben					
China	2.600.000	2.800.000	27 %	33.000.000	18 %	92.000.000
Peru	1.200.000	1.500.000	14 %	18.000.000	10 %	23.000.000
Australien	1.380.000	1.400.000	13 %	42.000.000	23 %	100.000.000
USA	727.000	740.000	7 %	14.000.000	8 %	90.000.000
Kanada	710.000	680.000	6 %	5.000.000	3 %	30.000.000
Mexiko	480.000	480.000	5 %	7.000.000	4 %	25.000.000
Kasachstan	400.000	400.000	4 %	14.000.000	8 %	35.000.000
andere Länder	2.500.000	2.500.000	24 %	49.000.000	27 %	87.000.000
Welt gesamt	10.000.000	10.500.000	100 %	180.000.000	100 %	480.000.000

Anmerkung: Die Werte beziehen sich auf die Bergbauproduktion und die Produktionsdaten 2007 sind geschätzt. Die Produktionsdaten beziehen sich auf den Gehalt von Zink in Konzentraten und Erz für den direkten Transport.

Zinn	Produktion 2006	Produktion 2007	Anteil an Weltproduk- tion 2007	Reserven	Anteil an Welt- reserven	Reserven- basis
	[t], sofern nicht anders angegeben					
China	125.000	130.000	43 %	1.700.000	28 %	3.500.000
Indonesien	90.000	85.000	28 %	800.000	13 %	900.000
Peru	38.000	38.000	13 %	710.000	12 %	1.000.000
Bolivien	18.000	18.000	6 %	450.000	7 %	900.000
Brasilien	12.000	12.000	4 %	540.000	9 %	2.500.000
Russland	3.000	4.000	1 %	300.000	5 %	350.000
Vietnam	3.500	3.500	1 %	N/A		N/A
Kongo (Kinshasa)	2.800	3.000	1 %	N/A		N/A
Malaysia	3.000	3.000	1 %	1.000.000	16 %	1.200.000
Australien	2.000	2.200	1 %	150.000	2 %	300.000
Portugal	200	200	0 %	70.000	1 %	80.000
Thailand	200	200	0 %	170.000	3 %	200.000
USA	—	—		—		40.000
andere Länder	4.000	4.000	1 %	180.000	3 %	200.000
Welt gesamt	302.000	300.000	100 %	6.100.000	100 %	11.000.000

Anmerkung: Die Werte beziehen sich auf die Bergbauproduktion und die Produktionsdaten 2007 sind geschätzt.

Zirkonium	Produktion 2006	Produktion 2007	Anteil an Weltproduk- tion 2007	Reserven	Anteil an Welt- reserven	Reserven- basis
	[t], sofern nicht anders angegeben					
Australien	491.000	550.000	44 %	9.100.000	24 %	30.000.000
Südafrika	398.000	405.000	33 %	14.000.000	37 %	14.000.000
China	170.000	170.000	14 %	500.000	1 %	3.700.000
Ukraine	35.000	35.000	3 %	4.000.000	11 %	6.000.000
Brasilien	26.000	26.000	2 %	2.200.000	6 %	4.600.000
Indien	21.000	21.000	2 %	3.400.000	9 %	3.800.000
USA	W	W		3.400.000	9 %	5.700.000
andere Länder	38.000	32.000	3 %	900.000	2 %	4.100.000
Welt gesamt	1.180.000	1.240.000	100 %	38.000.000	100 %	72.000.000

Anmerkung: Die Werte beziehen sich auf die Bergbauproduktion und die Produktionsdaten 2007 sind geschätzt. Die Reservedaten beziehen sich auf ZrO₂.

Tab. 10-2: Weltweite Produktionsmengen, Reservemengen und statische Reichweite⁵³ von Metallen, jeweils bezogen auf das Jahr 2007; die statische Reichweite wurde durch Division der Reserven durch die Produktionsmengen berechnet

Abk.	Metall	Produktion 2007 (USGS /andere)	Produktion 2006 (USGS)	Produktion (andere)	Reserven 2007 (USGS 2008 / andere)	Reservenbasis 2007 (USGS 2008)	Statische Reichweite	Bemerkungen
		[t]					[a]	
Ag	Silber	20.500	20.200		270.000	570.000	13	weltweite Bergbauproduktion
Al	Aluminium	38.000.000	33.700.000		11.250.000.000	13.500.000.000	296	weltweite Hüttenproduktion nach USGS; Reserven / Reservenbasis für Bauxit (25.000.000.000 t bzw. 32.000.000.000 t), umgerechnet auf Aluminium
As	Arsen	59.000	59.800		885.000	885.000	15	weltweite Hüttenproduktion; die Reserven und Reservenbasis sind nur unzureichend erforscht. Die Reserven und die Reservenbasis sollen ca. 20-30 mal die Jahresproduktion umfassen, weshalb für die Reserven bzw. für die Reservenbasis jeweils ein Faktor 15 angenommen wurde; die Reserven der USA betragen 80.000 t.
Au	Gold	2.500	2.460		42.000	90.000	17	weltweite Bergbauproduktion
Ba	Barium	4.720.000	4.696.400		112.100.000	519.200.000	24	weltweite Bergbauproduktion als Baryt/Barium- sulfat; Bariumsulfatproduktion umgerechnet auf Bariummetall (Faktor 0,59)
Be	Beryllium	130	180		15.900	80.000	122	weltweite Bergbauproduktion; Reserven und Ressourcen sind nur unzureichend erforscht; die Reserven beziehen sich nur auf die Reserven der USA, d.b. die weltweiten Reserven sind wesentlich größer

⁵³ Erläuterungen zur Tabelle: siehe Anhang 1 – Erläuterungen zu weltweiten Produktionsmengen, Reservemengen und statischen Reichweiten.

Abk.	Metall	Produktion 2007 (USGS /andere)	Produktion 2006 (USGS)	Produktion (andere)	Reserven 2007 (USGS 2008 / andere)	Reservenbasis 2007 (USGS 2008)	Statische Reichweite	Bemerkungen
		[t]					[a]	
Bi	Bismut	5.700	5.700		320.000	680.000	56	weltweite Bergbauproduktion
Ca	Calcium	236.000.000	241.000.000		äußerst groß	äußerst groß	sehr groß	Angaben nur für Kalk (CaO) und Zement (Calciumaluminiumsilikat), keine Statistiken für Kalzium verfügbar; Werte umgerechnet auf Calciumgehalt (Faktor 0,87)
Cd	Cadmium	19.900	19.300		490.000	1.200.000	25	weltweite Raffinerieproduktion
Ce	Cer	19.550	siehe REE	7.990	siehe REE	siehe REE	siehe REE	keine Statistiken bei USGS; geschätzte Werte der Produktion von Ceroxid nach Lenntech (23.000 t) (ohne Jahresangabe), Produktion von Ceroxid gemäß Rutherford 9.400 t; Produktionswerte von Ceroxid umgerechnet auf Metallgehalt (Faktor für Ce ₂ O ₃ 0,85)
Co	Cobalt	62.300	67.500		7.000.000	13.000.000	112	weltweite Bergbauproduktion
Cr	Chrom	20.000.000	19.600.000		475.000.000	800.000.000	24	weltweite Bergbauproduktion; Ressourcen größer als 12.000.000.000 t; die Reserven sind nur für Indien, USA, Kasachstan und Südafrika ausgewiesen, d.b. die weltweiten Reserven sind wesentlich größer
Cs	Cäsium	20	N/A		70.000	110.000	3.500	keine Statistiken zur Produktion bei USGS; Produktion nach Lenntech (20 t) (ohne Jahresangabe); Reserven von USGS auf Basis von Pollucite (Ca-Na-Aluminiumsilikat) berechnet. Sie beziehen sich vermutlich auf den Metallgehalt.
Cu	Kupfer	15.600.000	15.100.000		490.000.000	940.000.000	31	weltweite Bergbauproduktion
Dy	Dysprosium	100	N/A		siehe REE	siehe REE	siehe REE	keine Statistiken für Dysprosium bei USGS; geschätzte Werte der Produktion nach Lenntech (ohne Jahresangabe); unsicher ist, ob sich die Werte auf Oxide beziehen; s.a. REE

Abk.	Metall	Produktion 2007 (USGS /andere)	Produktion 2006 (USGS)	Produktion (andere)	Reserven 2007 (USGS 2008 / andere)	Reservenbasis 2007 (USGS 2008)	Statische Reichweite	Bemerkungen
		[t]					[a]	
Er	Erbium	500	N/A	100	siehe REE	siehe REE	siehe REE	keine Statistiken gemäß USGS; geschätzte Werte bewegen sich zwischen 100 t, nach Ruby, und 500 t, nach Lenntech (ohne Jahresangaben); keine validen Statistiken für Erbium, s. a. REE
Eu	Europium	100	N/A		150.000	siehe REE	1500	keine Jahresangaben der Daten, geschätzte Werte von Lenntech, vermutlich als Metall; keine Statistiken für Europium bei USGS; s.a. REE
Fe	Eisen	940.000.000	865.000.000		73.000.000.000	160.000.000.000	78	Produktionsangaben für Roheisen; bei Reserven und Ressourcen Eisenanteil im Erz
Ga	Gallium	80	80		15.000	N/A	188	Gallium wird zumeist aus Bauxit gewonnen, welches durchschnittlich 50 ppm Ga enthält; Galliumreserven können somit über Bauxitreserven bestimmt werden, so dass diese nach Daten von USGS (2008) ca. 15.000 t betragen
Gd	Gadolinium	400	N/A	100	1.000.000	siehe REE	2500	keine Statistiken bei USGS; geschätzte Werte nach Ruby, weniger als 100 t und nach Lenntech ca. 400 t (ohne Jahresangabe); s.a. REE
Ge	Germanium	90	100	80	N/A	N/A	N/A	weltweite Raffinerieproduktion nach USGS (90 t) bzw. Lenntech (80 t)
Hf	Hafnium	50		5	427.000	770.000	8540	Produktionsdaten nach Lenntech ohne Jahresangaben; nach Rutherford werden nur 5 t pro Jahr hergestellt (unklar ob Metall oder Oxid); Reserven an HfO ₂ : 610.000 t; Ressourcen: 1.100.000 t, beides nach USGS; umgerechnet auf Metallgehalt (Faktor für HfO ₂ : 0,7)

Abk.	Metall	Produktion 2007 (USGS /andere)	Produktion 2006 (USGS)	Produktion (andere)	Reserven 2007 (USGS 2008 / andere)	Reservenbasis 2007 (USGS 2008)	Statische Reichweite	Bemerkungen
		[t]					[a]	
Hg	Quecksilber	1.480	1.500		46.000	240.000	31	weltweite Bergbauproduktion; für China, den wichtigsten Produzenten, fehlen Reserven-angaben
Ho	Holmium	100	siehe REE	10	40.000	siehe REE	400	keine Statistiken bei USGS; geschätzte Werte der Produktion nach Lenntech (10 t) und nach Rutherford (< 100 t); s.a. REE
In	Indium	510	580		11.000	16.000	22	weltweite Raffinerieproduktion
Ir	Iridium	3	siehe PGM		siehe PGM	siehe PGM	siehe PGM	geschätzter Wert nach Lenntech; keine Statistiken zu Iridium bei USGS; Wilburn gibt die Reserven für Iridium in China zu ca. 12,4 t an (USGS, o.J.: 42) (keine Jahresangaben); s.a. PGM
K	Kalium	18.150.000	16.005.000		4.565.000.000	9.900.000.000	252	keine Statistiken für Kalium, Angaben beziehen sich auf K ₂ O; Produktionsdaten von K ₂ O, umgerechnet auf Metallgehalt (Faktor 0,55); die Metallproduktion von Kalium beträgt nach Rutherford 200 t
La	Lanthan	10.200	siehe REE	7.225	5.100.000	siehe REE	500	keine Statistiken für Lanthan bei USGS; die Produktion an Lanthanoxid beträgt nach Rutherford 8.500 t, nach Lenntech 12.000 t; Reserven in Form von Lanthanoxid nach Lenntech, umgerechnet auf Metallgehalt (Faktor für La ₂ O ₃ : 0,85)
Li	Lithium	25.000	23.500		4.100.000	11.000.000	164	andere Schätzungen bestimmen die Reservenbasis auf bis zu 13.000.000 t

Abk.	Metall	Produktion 2007 (USGS /andere)	Produktion 2006 (USGS)	Produktion (andere)	Reserven 2007 (USGS 2008 / andere)	Reservenbasis 2007 (USGS 2008)	Statische Reichweite	Bemerkungen
		[t]					[a]	
Mg	Magnesium	1.334.000	1.177.400		638.000.000	1.044.000.000	478	weltweite Bergbauproduktion: Reserven und Reservenbasis von Magnesit ($MgCO_3$) nach USGS; Angaben hinsichtlich Magnesit, umgerechnet auf Metallgehalt (Faktor 0,29)
Mn	Mangan	11.600.000	11.900.000		460.000.000	5.200.000.000	40	weltweite Bergbauproduktion
Mo	Molybdän	184.000	187.000		8.600.000	19.000.000	47	weltweite Bergbauproduktion
Na	Natrium	2.019.400			627.000.000	874.000.000	310	die Produktionsangabe bezieht sich auf die weltweite Produktion von Natriumsulfat (2004) (5,75 Mt) und Natriumkarbonat (40,3 Mt), nach USGS; als Beiprodukt der chemischen Industrie fallen 1,5 bis 2 Mt Natriumsulfat an; die Angabe der Reserven bezieht sich auf natürliches Natriumsulfat, hingegen ist die Produktion von Natronlauge nicht berücksichtigt; Natrium ist in Form von NaCl zudem als natürliches Meersalz in äußerst großen Mengen vorhanden, ebenso als Steinsalz in terrestrischen Lagerstätten; Angaben umgerechnet auf Metallgehalt (Faktor 0,19 für Sulfat bzw. 0,23 für Karbonat)
Nb	Niob	45.000	44.000		2.700.000	3.000.000	60	weltweite Bergbauproduktion; nur die Reserven und Ressourcen der wichtigsten Förderländer sind untersucht
Nd	Neodym	6.020	siehe REE	2.494	6.880.000	siehe REE	1.143	keine Statistiken bei USGS; geschätzte Werte für die Oxide nach Lenntech (ohne Jahresangabe), Produktion nach Ruby/Rutherford: 2.900 t (ohne Jahresangabe); Produktion und Reserven umgerechnet auf Metallgehalt (Faktor für Nd_2O_3 : 0,86); s.a. REE

Abk.	Metall	Produktion 2007 (USGS /andere)	Produktion 2006 (USGS)	Produktion (andere)	Reserven 2007 (USGS 2008 / andere)	Reservenbasis 2007 (USGS 2008)	Statische Reichweite	Bemerkungen
		[t]					[a]	
Ni	Nickel	1.660.000	1.580.000		67.000.000	150.000.000	40	weltweite Bergbauproduktion
Os	Osmium	0,1	siehe PGM		siehe PGM	siehe PGM	siehe PGM	keine Statistiken bei USGS; Produktion gemäß Lenntech (ohne Jahresangabe); Reserven in China nach Wilburn ca. 12,4 t (s. USGS, o.J.: 42); s .a. PGM
Pb	Blei	3.550.000	3.470.000		79.000.000	170.000.000	22	weltweite Bergbauproduktion
Pd	Palladium	232	224	195	siehe PGM	siehe PGM	siehe PGM	weltweite Bergbauproduktion; die Angaben zu den Reserven beziehen sich bei USGS auf alle PGM; Kanada, Russland, Südafrika und die USA decken 95 % der Weltproduktion ab; die BGR schätzt die Produktion von Palladium in 2003 auf 195 t
PGM	Platin- gruppen- metalle (Platin, Palladium, Rhodium, Ruthenium, Osmium, Iridium)	445	462		71.000	80.000	160	weltweite Bergbauproduktion von Platin und Palladium; Wilburn und Bleiwas geben die Reserven für das Jahr 2002 mit 14.000 t PGM an, davon ca. 12.000 t in Südafrika; die Reservenangaben beziehen sich bei USGS (o.J.) auf alle PGM; PGM werden vor allem aus drei Quellen gewonnen: als Primärressourcen, als Nebenprodukt aus der Nickel- und Kupfer- herstellung sowie durch Recycling; in Südafrika werden die PGM vor allem aus Primär- ressourcen, in Russland und Kanada während der Nickel-Kupfer-Produktion gewonnen; die Produktionsmengen der PGM betrugen im Jahr 2002: Platin ca. 10.000 kg (325.000 oz), Palladium 7.900 kg (255.000 oz), Rhodium 1.300 kg (42.000 oz) (USGS: PGM World Supply and Demand 2001-2007)

Abk.	Metall	Produktion 2007 (USGS /andere)	Produktion 2006 (USGS)	Produktion (andere)	Reserven 2007 (USGS 2008 / andere)	Reservenbasis 2007 (USGS 2008)	Statische Reichweite	Bemerkungen
		[t]					[a]	
Pm	Promethium	N/A	N/A		N/A	N/A	N/A	keine Statistiken bei USGS; Promethium ist aufgrund seiner ungeraden Kernladungszahl nicht stabil
Pr	Praseodym	2.500	siehe REE		2.000.000	siehe REE	800	keine Statistiken bei USGS; geschätzte Werte für Produktion und Reserven nach Lenntech (o.J.); Angaben beziehen sich vermutlich auf Oxide des Praseodyms, umgerechnet auf Metallgehalt (Faktor für Pr_2O_3 : 0,88); s.a REE
Pt	Platin	230	221	200	30.000	siehe PGM	130	weltweite Bergbauproduktion; Lenntech schätzt die Reserven von Platin auf 30.000 t; die Angaben zu den Reserven beziehen sich bei USGS auf alle PGM; Kanada, Russland, Südafrika und die USA decken 97 % der Produktion ab; die BGR schätzt die Produktion von Platin in 2003 auf 200 t
Rb	Rubidium	N/A	N/A		N/A	N/A	N/A	Rubidium wird aus Lepidolit (Lithiummineral) und Pollucite (Ca-Na-Aluminiumsilikat) gewonnen, v.a. in Kanada als Nebenprodukt der Gewinnung von Lithiumsalzen; die Reserven sollen sehr reichhaltig sein
Re	Rhenium	50	47		2.500	10.000	51	weltweite Bergbauproduktion
REE	Seltene Erden	123.000	124.000		88.000.000	150.000.000	715	weltweite Bergbauproduktion, nur Daten für China, Indien, Brasilien und Malaysia liegen vor

Abk.	Metall	Produktion 2007 (USGS /andere)	Produktion 2006 (USGS)	Produktion (andere)	Reserven 2007 (USGS 2008 / andere)	Reservenbasis 2007 (USGS 2008)	Statische Reichweite	Bemerkungen
				[t]			[a]	
Rh	Rhodium	16	siehe PGM	23	3.000	siehe PGM	188	keine Statistiken bei USGS; Produktion nach Lenntech (o.J.); die BGR schätzt die Weltproduktion in 2003 auf 23,3 t; Wilburn gibt die Produktion von Südafrika in 2001 zu 14 t an, von Russland mit ca. 4 t; Wilburn weist die Reserven in China zu ca. 6,2 t aus (USGS, o.J., Wilburn, o.J.: 42)
Ru	Ruthenium	12	siehe PGM		5.000	siehe PGM	417	keine Statistiken bei USGS; Produktion und Reserven nach Lenntech (o.J.); Wilburn gibt die Reserven für Ruthenium in China zu 12,4 t an (USGS, o.J., Wilburn, o.J.: S.42); s.a. PGM
Sb	Antimon	135.000	134.000		2.100.000	4.300.000	16	weltweite Bergbauproduktion
Sc	Scandium	50	N/A	0,05	N/A	N/A	N/A	keine Statistiken bei USGS; nach Rutherford (o.J.): geschätzte Produktionsmenge 50 t; Lenntech gibt eine Produktionsmenge von 50 kg an. Nach Lenntech wird Scandium als Nebenprodukt der Urananreicherung bzw. der Produktion anderer Metalle gewonnen, überwiegend in China
Se	Selen	1.540	1.500		82.000	170.000	53	weltweite Raffinerieproduktion; Selen wird vor allem aus Kupferschlämmen gewonnen; für Japan, den wichtigsten Produzenten, liegen keine Angaben zu den Reserven vor
Sm	Samarium	1.800	siehe REE	630	1.800.000	siehe REE	1.000	keine Statistiken bei USGS; Ruby schätzt die Produktion (Weltbedarf) auf 2.000 t Samariumoxid bzw. 1.800 t Samarium; Werte für Produktion und Reserven umgerechnet auf Metallgehalt (Faktor 0,9); s.a. REE
Sn	Zinn	300.000	302.000		6.100.000	11.000.000	20	weltweite Bergbauproduktion

Abk.	Metall	Produktion 2007 (USGS /andere)	Produktion 2006 (USGS)	Produktion (andere)	Reserven 2007 (USGS 2008 / andere)	Reservenbasis 2007 (USGS 2008)	Statische Reichweite	Bemerkungen
		[t]					[a]	
Sr	Strontium	600.000	585.000		6.800.000	12.000.000	11	weltweite Bergbauproduktion
Ta	Tantal	1.400	1.400		130.000	180.000	93	weltweite Bergbauproduktion; für die meisten afrikanischen Produzenten liegen keine Angaben der Reserven und Reservenbasis vor
Tb	Terbium	100	siehe REE	10	300.000	siehe REE	3.000	keine Statistiken bei USGS; für Produktion und Reserven geschätzte Werte nach Lenntech (o.J.); nach Ruby ist die Produktion geringer als 100 t pro Jahr; unsicher, ob Bezug auf Terbiumoxid oder metallisches Terbium; s.a. REE
Te	Tellur	135	132		21.000	47.000	156	weltweite Raffinerieproduktion
Ti	Titan	6.858.000	7.141.000		846.000.000	1.740.000.000	123	Produktion und Reserven von Titandioxid (Produktion inkl. Titanschwamm) gemäß USGS, umgerechnet auf Metallgehalt (Faktor TiO_2 : 0,6); die Produktion von Titandioxid (inkl. USA) betrug 11,7 Mio. t in 2007 und 11,2 Mio. t in 2006, die weltweite Produktion von Titanschwamm (ohne USA) betrug 138.000 t in 2007 bzw. 112.000 t in 2006; Titan und Titandioxid werden vor allem aus Ilmenit und Rutil gewonnen; die Herstellung von Titanschwamm ist sehr aufwändig und nur durch hohen Einsatz von Energie und anderer Ressourcen möglich (unter anderem Magnesium)
Tl	Thallium	10	10		380	650	38	weltweite Bergbauproduktion nach USGS; allerdings wird Thallium vor allem aus Flugasche der Kupfer-, Zink- und Bleiverhüttung gewonnen

Abk.	Metall	Produktion 2007 (USGS /andere)	Produktion 2006 (USGS)	Produktion (andere)	Reserven 2007 (USGS 2008 / andere)	Reservenbasis 2007 (USGS 2008)	Statische Reichweite	Bemerkungen
		[t]					[a]	
Tm	Thulium	100	siehe REE	50	100.000	siehe REE	1.000	keine Statistiken bei USGS; für Produktion (50 t) und Reserven geschätzte Werte nach Lenntech (o.J.); nach Rutherford ist die Produktion bzw. Nutzung geringer als 100 t pro Jahr; unsicher, ob Bezug auf Thuliumoxid oder metallisches Thulium (Werte nicht umgerechnet auf Metallgehalt)
V	Vanadium	58.600	55.700		13.000.000	38.000.000	222	weltweite Bergbauproduktion
W	Wolfram	89.600	90.800		2.900.000	6.300.000	32	weltweite Bergbauproduktion
Y	Yttrium	7.031	7.031		426.600	482.000	853	Werte umgerechnet auf Metallgehalt (Faktor Y_2O_3 : 0,79); s.a. REE
Yb	Ytterbium	100	siehe REE	50	1.000.000	siehe REE	10.000	für Produktion und Reserven geschätzte Werte nach Lenntech (o.J.); nach Ruby ist die Produktion geringer als 100 t pro Jahr; unsicher, ob Bezug auf Ytterbiumoxide oder metallisches Ytterbium (Werte nicht umgerechnet auf Metallgehalt); s.a. REE
Zn	Zink	10.500.000	10.000.000		180.000.000	480.000.000	17	weltweite Bergbauproduktion
Zr	Zirkon	873.200	917.600		28.120.000	53.280.000	32	Produktion und Reserven von ZrO_2 , umgerechnet auf Metallgehalt (Faktor ZrO_2 : 0,74); die weltweite Bergbauproduktion gemäss USGS (ohne USA) betrug 1,24 Mio. t in 2007 und 1,18 Mio. t in 2006; die Reserven betrugen ca. 38.000.000 t und die Ressourcen ca. 72.000.000 t ZrO_2

Tab. 10-3: Geographische Konzentration der weltweiten Produktion (Primärproduktion) und der Reserven

Metall	Produktion	Reserven
Aluminium (Bauxit)	Australiens Anteil an der Weltproduktion liegt bei 34 %. Zusammen mit China und Brasilien liegt der Produktionsanteil bei fast 65 %.	Guinea verfügt über 30 % der Aluminiumreserven. Guinea und Australien verfügen zusammen über 50 % der Weltreserven.
Aluminium (Metall)	Der Anteil Chinas an der Weltaluminiumproduktion beträgt 32 %. Russland (11 %), Kanada (8 %) und die USA (7 %) haben zusammen einen Produktionsanteil von 26 %, so dass die Produktion dieser vier Länder insgesamt fast 60 % der Weltproduktion ausmacht.	
Antimon	China ist für 81 % der Weltproduktion von Antimon verantwortlich. Bolivien, Südafrika und Russland verfügen zusammen über 12 % der Produktion.	China hat einen Anteil von 38 % an den Weltreserven. Thailand verfügt über 20 %, Russland über 17 % und Bolivien über 15 % der Reserven. Zusammen verfügen diese vier Länder über 90 % der Weltreserven.
Arsen (Arsentrioxid)	China produziert über 50 % Arsentrioxid. Zusammen mit Chile (19 %) und Marokko (12 %) haben diese drei Länder einen Anteil von über 80 % an der Weltproduktion.	
Barium (Bariumsulfat)	China hat einen Anteil an der Bariumsulfatweltproduktion von 55 %. Zusammen mit Indien (13 %), Marokko (8 %) und den USA (7 %) beträgt der Anteil über 80 %.	China (33 %) und Indien (28 %) verfügen zusammen über 60 % der Weltreserven. Die USA, Marokko, Algerien, Thailand und Mexiko verfügen zusammen über 27 % der Reserven.
Beryllium	Die USA verfügen über einen Produktionsanteil von 77 %. China produziert 15 % und Mosambik 5 %. Zusammen haben diese drei Länder einen Anteil von 97 % an der Weltproduktion.	
Bismut	China hat einen Anteil von 53 % an der Weltproduktion. Zusammen mit Mexiko (21 %) und Peru (17 %) ist die Weltproduktion mit über 90 % weitgehend auf diese drei Länder konzentriert.	China verfügt über 75 % der Weltreserven.
Blei	China hat einen Anteil von 37 % an der Weltproduktion. Australien (18 %), die USA (12 %) und Peru (9 %) verfügen zusammen über einen Anteil von fast 40 %. Diese vier Länder haben zusammen einen Anteil von fast 80 % an der Weltproduktion.	Australien verfügt über 30 % der Weltreserven. China (14 %), die USA (10 %), Kasachstan (6 %) und Peru (4 %) verfügen zusammen über 34 % der Reserven. Zusammen verfügen diese fünf Länder über 60 % der Weltreserven.
Cadmium	Südkorea mit 18 % und China mit 17 % haben die höchsten Anteile an der Weltcadmiumproduktion. Kanada und Japan verfügen über jeweils 11 %, Kasachstan über 10 % sowie Mexiko über 8 % und Russland über 6 %. Diese sieben Länder haben zusammen einen Anteil von über 80 % der Weltproduktion.	China verfügt über 20 % der Weltreserven. Weitere nennenswerte Reserven befinden sich in Australien (13 %), Peru (11 %), den USA (9 %) und Kasachstan (8 %). Diese fünf Länder verfügen insgesamt über 60 % der Weltreserven.

Metall	Produktion	Reserven
Calcium (Calciumoxid)	Chinas Anteil an der Weltproduktion beträgt 61 %. Die USA haben einen Anteil von 7 % und Japan, Russland und Deutschland jeweils 3 %. Zusammen haben diese fünf Länder einen Anteil von fast 80 % an der Weltproduktion.	
Chrom	Südafrika hat einen Anteil von 38 % an der Weltchromproduktion. Indien und Kasachstan haben jeweils einen Anteil von 18 %, so dass diese drei Länder zusammen 74 % der Weltproduktion ausmachen.	USGS macht keine Angaben über die Weltreserven. Nach eigenen Berechnungen verfügt Kasachstan über 61 %, Südafrika über 34 % und Indien über 5 % der angegebenen Reserven.
Cobalt	Kongo (Kinshasa) hat einen Anteil von 36 % an der Weltproduktion. Weitere nennenswerte Anteile an der Weltproduktion haben Kanada mit 13 %, Australien mit 12 %, Sambia mit 11 %, Russland mit 8 % und Kuba mit 6 %. Zusammen haben diese sechs Länder einen Anteil von 86 %.	Kongo (Kinshasa) verfügt über 49 % der Weltreserven. Australien verfügt über 20 % und Kuba über 14 % der Reserven, so dass diese drei Länder insgesamt über 80 % der Weltreserven verfügen.
Eisen (Eisenerz)	China hat einen Anteil von 32 % an der Weltproduktion, gefolgt von Brasilien mit 19 % und Australien mit 17 %. Diese drei Länder haben zusammen einen Produktionsanteil von fast 70 %. Mit Indien, Russland und der Ukraine liegt der Anteil bei insgesamt 86 %.	Russland verfügt über 19 % der Reserven, gefolgt von Australien mit 14 %, Brasilien und der Ukraine mit je 12 %, China mit 10 % und Indien und Kasachstan mit 6 % bzw. 5 %. Damit verfügen die genannten Länder über insgesamt 66 % der Reserven.
Eisen (Roheisen)	China hat einen Anteil von 49 % an der Weltproduktion von Roheisen. Zusammen mit Japan (9 %), Russland (5 %), den USA, der Ukraine und Brasilien mit einem Anteil von jeweils 4 % liegt der Anteil dieser sechs Länder bei insgesamt 75 %.	
Gold	Australien und Südafrika produzieren jeweils 11 % der weltweiten Goldproduktion, China und die USA jeweils 10 %. Diese vier Länder weisen zusammen einen Produktionsanteil von 42 % auf. Zusammen mit Peru (7 %), Russland (6 %), Indonesien (5 %) und Kanada (4 %) beträgt der Anteil dieser Länder an der Weltproduktion insgesamt 64 %.	Südafrika verfügt über 14 % der Weltreserven und Australien über 12 %, so dass beide Länder zusammen über ein Viertel der weltweiten Goldreserven verfügen. Zusammen mit Peru (8 %), Russland (7 %) und den USA (6 %) liegt der Anteil insgesamt bei knapp 50 %.
Hafnium (Hafniumdioxid)		Südafrika verfügt über 46 % und Australien über 30 % der Reserven.
Indium	Chinas Anteil an der Indiumproduktion liegt bei 49 %, gefolgt von Südkorea mit 17 %, Kanada und Japan mit je 10 % und Belgien mit 6 %. Zusammen haben diese fünf Länder einen Anteil an der Weltproduktion von 92 %.	China verfügt über 73 % der weltweiten Indiumreserven. Weitere relevante Anteile an besitzen Peru und die USA mit je 3 % und Russland und Kanada mit je 1 %.

Metall	Produktion	Reserven
Kalium (Kaliumoxid)	Kanada produziert 33 % der Weltproduktion. Zusammen mit Russland (19 %), Belarus (16 %), Deutschland (11 %) und Israel (6 %) kommen diese Länder auf einen Produktionsanteil von 85 %.	Kanada verfügt über 53 % der Weltreserven, gefolgt von Russland mit 22 %; zusammen verfügen diese beiden Länder somit 75 %. Belarus und Deutschland verfügen über je 9 % der weltweiten Reserven. Zusammen verfügen diese vier Länder über 93 %.
Kupfer	Chiles Anteil an der weltweiten Produktion beträgt 37 %. Der Anteil der USA und Perus beträgt je 8 %, und Australien und Indonesien haben jeweils einen Anteil von 6 %. Diese fünf Länder kommen zusammen auf einen Produktionsanteil von 65 %.	Chile verfügt über 31 % der weltweiten Weltreserven, gefolgt von den USA und Indonesien mit je 7 % und von Peru, Polen und Mexiko mit je 6%. Diese sechs Länder verfügen zusammen über 63 % der Weltreserven.
Lithium	Chile hat einen Anteil von 38 % an der weltweiten Lithiumproduktion. Australien produziert 22 %, Argentinien und China jeweils 12 % und Russland 9 %. Diese fünf Länder haben insgesamt einen Anteil von über 90 % an der Weltproduktion.	Chile verfügt über 73 % der Weltreserven. Es folgt China mit 13 %. Zusammen verfügen die beiden Länder über 86 % der Weltreserven.
Magnesium (Magnesit)	China hat einen Anteil von 41 % an der Weltproduktion. Die Türkei produziert 20 %, gefolgt von Nordkorea und Russland mit je 8 %. Diese vier Länder haben insgesamt einen Anteil von 77 % an der Weltproduktion.	Österreich verfügt über 30 %, Nordkorea über 20 % und China über 17 % der Weltreserven. Damit verfügen diese drei Länder über fast 70 % der Weltreserven.
Mangan	Südafrika verfügt über einen Anteil von 20 % an der Weltproduktion, gefolgt von Australien mit 19 %, China mit 14 % und Gabun mit 13 %. Damit produzieren diese vier Länder 66 % der Weltproduktion. Zusammen mit Brasilien (9 %), der Ukraine (7 %) und Indien (6 %) kommen diese Länder auf einen Anteil von fast 90 %.	Die größten Reserven liegen in der Ukraine (30 %), Südafrika (22 %), Australien (13 %) und Indien (12 %). Damit verfügen diese vier Länder über 77 % der Weltreserven.
Molybdän	Den höchsten Anteil an der Molybdänproduktion haben die USA mit 32 %, gefolgt von China mit 25 % und Chile mit 22 %. Damit haben diese drei Länder einen Anteil von fast 80 % an der Weltproduktion.	Die größten Reserven liegen in China (38 %), den USA (31 %) und Chile (13 %). Zusammen macht ihr Anteil über 80% der Weltreserven aus.
Natrium (Natriumsulfat)		Der Anteil der USA an den Weltreserven liegt bei 26 %. Zusammen mit Mexiko und Spanien (je 5 %) und Kanada und der Türkei (je 3 %) machen diese Länder einen Anteil von über 40 % aus.
Nickel	Russlands Anteil an der Nickelproduktion liegt bei 19 %, gefolgt von Kanada mit 16 % und Australien mit 11 %. Zusammen mit Indonesien (9 %), Neukaledonien (7 %) und Kolumbien (6 %) liegt der Anteil dieser Länder an der Weltproduktion bei fast 70 %.	Die größten Nickelreserven hat Australien mit 36 %. Neukaledonien verfügt über 11 %, Russland über 10 %, Kuba über 8 %, Brasilien und Kanada über jeweils 7 % und Südafrika über 6 %. Zusammen kommen diese sieben Länder auf einen Anteil von fast 85 %.
Niob	Den höchsten Anteil an der Produktion hat Brasilien mit 89 %. Kanada hat einen Anteil von 9 %. Brasilien und Kanada verfügen damit gemeinsam über einen Anteil an der Weltproduktion von 98 %.	96 % der Weltreserven liegen in Brasilien. Kanada verfügt über 2 % und Australien über 1 % der Weltreserven.

Metall	Produktion	Reserven
Palladium	Über 80 % der Produktion entfallen auf Russland (41 %) und Südafrika (40 %). Kanada produziert 8 % und die USA 6 %. Damit machen diese vier Länder einen Anteil von 95 % an der Weltproduktion aus.	Die Reserven werden nicht für Palladium, sondern kumuliert für die PGM ausgewiesen: Südafrika verfügt über 89 % der PGM-Weltreserven, Russland über 9 %. Damit verfügen diese beiden Länder über 98 % der PGM-Weltreserven.
Platin	Südafrika hat einen Anteil an der weltweiten Platinproduktion von 80 %. Zusammen mit Russland (12 %) liegt der Anteil der beiden Länder bei über 90 %.	Die Reserven werden nicht für Platin, sondern kumuliert für die PGM ausgewiesen: siehe Palladium.
Quecksilber	73 % der weltweiten Produktion entfallen auf China und 17 % auf Kirgisien. Diese beiden Länder haben somit einen Anteil von 90 % an der Weltproduktion von Quecksilber.	Kirgisien's Anteil an den Weltreserven beträgt 16 %. Es gibt keine Angaben zu den Weltreserven Chinas, dem weltgrößten Produzenten von Quecksilber.
Rhenium	Chile hat einen Anteil von 46 % an der weltweiten Produktion. Es folgen Kasachstan mit 16 %, die USA mit 15 % und Peru mit 10 %. Diese vier Länder verfügen somit über einen Anteil von fast 90 %.	Chile verfügt über 52 % der weltweiten Rheniumreserven. Es folgen die USA mit 16 %, Russland mit 12 % und Kasachstan mit 8 %. Damit verfügen diese vier Länder über fast 90 % der Weltreserven.
Selen	Japan produziert 48 % der weltweiten Selenproduktion. Kanada produziert 19 % und Belgien 13 %. Zusammen weisen diese drei Länder einen Anteil von 80 % an der Weltproduktion auf.	20 % der Reserven fallen auf Chile und 12 % auf die USA. Kanada verfügt über 7 %, Peru über 6 % und die Philippinen über 2 %. Zusammen verfügen diese Länder über fast 50 % der Weltreserven. Es sind keine Angaben zu den Reserven Japans verfügbar.
Seltene Erden	Chinas Anteil an der Weltproduktion liegt bei 97 %. Der Anteil Indiens liegt bei 2 % und derjenige Brasiliens bei 1 %.	China verfügt über 31 % der Weltreserven, die GUS über 22 %. Die USA verfügen über 15 % und Australien über 6 %. Zusammen verfügen diese Länder über 70 % der Weltreserven.
Silber	Peru hat einen Anteil von 17 % an der weltweiten Produktion, Mexiko von 15 %, China von 13 % und Australien von 10 %; diese vier Länder haben zusammen einen Anteil von über 50 %. Zusammen mit Chile (7 %), Polen, USA und Kanada (je 6 %) verfügen diese Länder über einen Anteil von 80 % an der weltweiten Produktion.	Polen hat mit 19 % den höchsten Anteil an den Silberreserven. Zusammen mit Mexiko (14 %), Peru (13 %) und Australien (11 %) liegt der Anteil dieser Länder bei fast 60 %. Zusammen mit China (10 %), USA (9 %) und Kanada (6 %) liegt der Anteil bei über 80 %.
Strontium	Spanien (33 %) und China (32 %) haben zusammen einen Anteil an der Weltproduktion von 65 %. Zusammen mit Mexiko (21 %) und der Türkei (10 %) liegt der Produktionsanteil bei 96 %.	
Tantal	Australiens Anteil an der Weltproduktion liegt bei 61 %. Zusammen mit Brasilien (18 %) liegt der Anteil bei fast 80 %.	Brasilien verfügt über einen Anteil von 68 % der Weltreserven und Australien über 31 %. Der Anteil dieser beiden Länder an den Weltreserven liegt daher bei nahezu 100 %.

Metall	Produktion	Reserven
Tellur	Zu den USA, die über die größten Reserven verfügen, liegen keine Produktionsdaten vor. Bezogen auf die veröffentlichten Produktionsdaten weist Kanada 56 % der Tellurproduktion auf. Zusammen mit Peru (26 %) und Japan (18 %) liegt der Anteil bezogen auf die veröffentlichten Daten bei 100 %.	Obwohl Kanada den größten Anteil an der Tellurproduktion besitzt, verfügt es nur über 3 % der Weltreserven. Peru verfügt über 8 % und die USA über 14 %. Der Anteil der drei größten Produzenten an den Weltreserven liegt damit bei lediglich 25 % der Weltreserven.
Thallium	Thallium wird vermutlich in einigen wenigen Ländern in geringem Umfang produziert.	Die wichtigste Thalliumquelle sind Zinkerze. Die Reserven von Thallium sind daher vermutlich ähnlich denen der Zinkreserven verteilt.
Titan (Metall)	Japan (28 %), China und Russland (je 23 %) haben zusammen einen Produktionsanteil von über 70 %. Zusammen mit Kasachstan (18 %) und der Ukraine (7 %) liegt der Anteil bei nahezu 100%.	
Titan (Titandioxid)	Australien (25 %), Südafrika (19 %) und Kanada (13 %) produzieren zusammen fast 60 % des Titandioxids. Mit China (8 %), Norwegen, Indien und der Ukraine (je 6%) beträgt der Anteil an der Weltproduktion insgesamt über 80 %.	China (27 %) und Australien (20 %) verfügen zusammen über fast 50 % der Weltreserven. Zusammen mit Indien (13 %), Südafrika (10 %) und Brasilien (6 %) liegt der Anteil dieser Länder an den Weltreserven bei fast 80 %.
Vanadium	Südafrika hat einen Anteil von 39 % an der Weltproduktion. Zusammen mit China (32 %) und Russland (27 %) liegt der Anteil an der Weltproduktion bei nahezu 100 %.	China und Russland verfügen jeweils über 38 % der Weltreserven, Südafrika über 23 %. Damit liegt der Anteil dieser drei Länder zusammen bei nahezu 100 %.
Wolfram	Chinas Anteil an der Weltproduktion beträgt 86 %, Russland folgt mit einem Anteil von 5 % und Kanada mit 3 %.	China verfügt über 62 % der Weltreserven. Zusammen mit Russland und Kanada mit Anteilen von jeweils 9 % plus den USA von 5 % verfügen diese vier Länder über einen Anteil von über 85 %.
Yttrium	China erzeugt nahezu 99 % der Weltproduktion.	China verfügt über 41 %, die USA über 22 % und Australien über 19 % der Weltreserven. Der Anteil dieser drei Länder beträgt insgesamt 82 % der Weltreserven.
Zink	China (27 %), Peru (14 %) und Australien (13 %) produzieren insgesamt über 50 % der Weltproduktion. Es folgen in der Liste der grössten Produzenten die USA mit 7 %, Kanada mit 6 % und Mexiko mit 5 %. Zusammen machen diese sechs Länder einen Anteil an der Weltproduktion von über 70 % aus.	Australien hat mit 23 % den größten Anteil an den Weltreserven. Zusammen mit China (18 %), den USA und Kanada (je 8 %) beträgt der Anteil dieser vier Länder an den Weltreserven insgesamt fast 60 %.
Zinn	China hat mit 43 % den größten Anteil an der Weltproduktion. China und Indonesien (28 %) produzieren zusammen über 70 % der Weltproduktion. Es folgen Peru (13 %) und Bolivien (6 %). Insgesamt machen diese vier Länder einen Produktionsanteil von 90 % aus.	Chinas Anteil an den Weltreserven beträgt 28 %. Zusammen mit Malaysia (16 %), Indonesien (13 %), Peru (12 %) und Brasilien (9 %) beträgt der Anteil dieser fünf Länder an den Weltreserven nahezu 80 %.

Metall	Produktion	Reserven
Zirkonium	Australiens Anteil an der Weltproduktion beträgt 44 %. Zusammen mit Südafrika (33 %) und China (14 %) liegt der Anteil an der Weltproduktion bei über 90 %.	Südafrika hat mit 37 % den größten Anteil an den Weltreserven. Die Reserven von Südafrika und Australien (24 %) machen zusammen mehr als 50 % der Weltreserven aus. Zusammen mit den weiteren Reserven der Ukraine (11 %), Indien und den USA (je 9 %) machen die Reserven dieser fünf Länder einen Anteil von 80 % der Weltreserven aus.

10.2 Anhang 2 – Anwendungen, feinverteilter Metalleinsatz und dissipative Verwendung⁵⁴

Erläuterungen zur Tabelle:

Anwendungsbereiche (Verwendung nach Sektoren): Die Angaben wurden den *Mineral Commodity Summaries* (U.S. Geological Survey) des Jahrgangs 2008 entnommen. Da für einige Metalle Informationen zur globalen Verwendung fehlen, wurden gegebenenfalls Daten aufgeführt, die die Verwendung in den Vereinigten Staaten beschreiben. Diese sind als erste, teils signifikant vereinfachte Näherung anzusehen, da die Verwendung von Metallen abhängig von den (landesspezifischen) Produktionsstrukturen ist und damit die globale Verwendung von derjenigen in den Vereinigten Staaten im Allgemeinen abweicht. Für einige Metalle liegen keinerlei Angaben vor (weder weltweit noch für die Vereinigten Staaten).

Metalleinsatz: Information, in welchen Sektoren oder für welche Produktgruppen die Metalle weltweit bzw. in den Vereinigten Staaten eingesetzt werden; auch hier dient der Datensatz zu den Vereinigten Staaten als erste Näherung für den weltweiten Metalleinsatz, falls dieser nicht beschrieben ist.

Feine Verteilung von Metallen / Dissipative Produktnutzung: Eine feine Verteilung eines Metalls liegt vor, wenn das Metall mit anderen Stoffen derart vermischt ist, dass eine Rückgewinnung ausgesprochen problematisch ist. Beispielsweise gilt dies für Bariumsulfat als Füllstoff in Kunststoffen oder als Glasbildner mit vielen anderen Oxiden zusammen in Bildröhren. Ferner liegt eine feine Verteilung vor, wenn das Metall in sehr geringen Mengen in andere Stoffe eingebettet wird (z.B. Antimon als Flammhemmer in Kunststoffen oder Gallium als Halbleiter). Schließlich werden unter „dissipativer Produktnutzung“ Verwendungen verstanden, die auf Verschleiß bzw. Verbrauch des Metalls ausgerichtet sind (z.B. Kaliumnitrat oder Kupfersulfat als Düngemittel, feuerfeste Steine aus Zirkon).

Eine feine Verteilung von Metallen *durch feine Verteilung von Produkten* liegt vor, wenn ein Metall entweder in sehr vielen unterschiedlichen Anwendungsbereichen genutzt wird (z.B. Zink in der Galvanisierung, in Legierungen, als Konstruktionswerkstoff, in EuE-Bauteilen, als Füllstoff oder als Futtermittel) oder wenn ein Metall (im wichtigsten Anwendungsbereich) in einer Vielzahl unterschiedlicher Produkte genutzt wird (z.B. Kupfer in den diversen Produkten der EuE-Branche).

⁵⁴ Erläuterungen zur Tabelle: siehe Anhang 1 – Produktion und Reserven der Metalle nach Ländern

In der Spalte Dissipativität (Diss.) erfolgt die Kennzeichnung der Dissipativität gemäss den verschiedenen Einsatzweisen (vgl. Kap. 2.2.6): FV: feine Verteilung (unterteilt in deutlich (FV-d) und weniger deutlich (FV)); KVV: keine feine Verteilung; ub: bisher „unbestimmt“; dissipative Produktnutzung (Eintrag kursiv).

Metall	Anwendungsbereiche	Metalleinsatz weltweit	Metalleinsatz USA	Diss.
Aluminium	Aluminium ist vor allem ein Konstruktionsmetall, welches sowohl in reiner Form als auch in Legierungen mit Kupfer, Nickel und Zink eingesetzt wird. Seine größten Anwendungsfelder liegen im Bauwesen, Fahrzeugbau und bei Verpackungen (Rutherford: Aluminium).		38 % Transport; 22 % Verpackungsmaterial; 16 % Gebäudebau; 7 % Elektrizität; 7 % Maschinenbau; 7 % Gebrauchsgüter; 3 % Sonstiges (USGS 2008)	KFV
Antimon	Antimon wird vor allem als Legierungsbestandteil zum Härten von Metallen, in der Reifenherstellung als Kautschukadditiv, als Flammschutzmittel in Kunststoffen sowie für Farben und Pigmente verwendet (USGS: Antimony).	75 % Flammschutzmittel (Angerer et al. 2008)	40 % feuerhemmende Mittel; 22 % Verkehrswesen (inkl. Batterien); 14 % Chemikalien; 11 % Keramik und Glas; 13 % andere Einsätze (USGS 2008)	FV-d
Arsen	Das Halbmetall wird vor allem zur Härtung von Stahl (z.B. Munition, 1 % Arsenzusatz, oder Bleischrot) und zur Härtung von Bleibatterien eingesetzt. Arsen verringert die Reibung von Lagern und ist auch in Auswuchtgewichten vorhanden. Weltweit wird es außerdem für den Pflanzenschutz, als Düngemittel und als Holzschutzmittel (chromiertes Kupferarsenat) eingesetzt. Ein wichtiges neues Feld sind Solarzellen. Weitere Anwendungen sind Infrarottechnologie und optische Materialien sowie andere Halbleiterprodukte (USGS: Arsenic). Auch in Feuerwerk wird es verwendet.			FV
Barium	Die wichtigste Verwendung von Barium ist in Form von Bariumsulfat als Füllstoff in Farben, Kunststoffen und Gummi. Weitere Anwendungen sind Schutzanstriche und Beschwerungsmittel in der Gas- und Ölförderung. Aufgrund seiner Dichte absorbiert es sehr gut Elektronenstrahlung, weshalb es in Nuklearanlagen und bei Röntgeneinrichtungen verwendet wird. Ebenso wird es in größeren Mengen im Schirmglas von Fernsehern eingesetzt. Spezifische Anwendungen sind Bremsklötze, Gummipuffer für LKW, Versiegelungsmittel für Autolacke, Zementverstärker für Pipelines. Reinstes Baryt wird als Kontrastmittel verwendet.			FV
Beryllium	Beryllium dient als Legierungsbestandteil von Kupfer, da es dessen mechanische Festigkeit deutlich erhöht. Es wird zumeist in LuK-Produkten (Computer, Automobilelektronik, Luftfahrt) verwendet (USGS 2008). Beryllium wird auch in der Reaktortechnik eingesetzt (Neutronenfänger) (Rutherford: Beryllium).		50 % für LuK-Produkte; 50 % für Luftfahrt, Militär, Automobilelektronik und anderes (USGS 2008)	FV-d

Metall	Anwendungsbereiche	Metalleinsatz weltweit	Metalleinsatz USA	Diss.
Bismut	Bismut wird vor allem als Additiv für Stahllegierungen, als Fluss- und Lötmetall, in Munition sowie in der Chemie und Pharmazie eingesetzt. Seit dem Verbot von Blei in Wasserrohren wird Bismut auch bei Rohrleitungen als Lötmetall eingesetzt. Ein anderes wichtiges Wachstumsfeld sind Zink-Bismut-Schichten bei der Galvanisierung. Darüber hinaus wird Bismut für Keramik und Kristallwaren verwendet.		47 % Stahladditive; 34 % schmelzbare Legierungen, Lötmetalle und Munition; 18 % Chemie und Pharmazie (USGS 2008)	FV-d
Blei	Blei wird vor allem für Automobilbatterien (Starterbatterien und Elektrofahrzeuge) und für leistungsstarke Notbatterien (Krankenhäuser, Telekommunikation) verwendet. In Gläsern und Keramiken werden Bleioxide verwendet. Kompakte Verwendungen sind Gewichte, Strahlungsschilde (Röntgeneinrichtungen), Spezialrohre, Kabelmäntel, spezielle Baumaterialien (z.B. Dachabdeckungen). Bedeutende dissipative Verwendungen sind Munition, Chemikalien, Pigmente sowie Keramik und Gläser.		98 % Batterien (USGS 2008)	KFV
Cadmium	Weltweit wird Cadmium vor allem in aufladbaren Batterien (NiCd-Akkumulatoren) eingesetzt. Darüber hinaus wird es immer noch zur Kunststofffärbung und als Stabilisator von Kunststoffen eingesetzt (USGS 2008). Es wird zudem in sicherheitsrelevanter Elektrik (Bahn) eingesetzt. Eine neue wichtige Anwendung sind PV-Zellen.		83 % für Batterien; 8 % für Pigmente; 7 % Beschichtungen; 7 % Kunststoffstabilisierer; 2 % Legierungen, PV u.a.	FV-d
Calcium	Calcium wird vor allem für die Baustoffindustrie (Zement) eingesetzt sowie für Gläser und Keramiken.			KFV
Cäsium	Die Bedeutung des Einsatzes von Cäsium ergibt sich durch die Emissionen von Elektronen bei Einwirkung von Photonen (Photoeffekt), weshalb es vor allem in optischen Bauteilen (Infrarotdetektoren, Nachtsichtgeräte, PV-Zellen) verwendet wird. Cäsiumformiat wird in der Öl- und Gasindustrie bei Hochdruckquellen als Drillagens verwendet. Atomuhren nutzen die Schwingung von Cäsium zur Zeitbestimmung. Deren Genauigkeit ist für die Raumfahrt, GPS-Systeme, Internet- und Mobilfunkübertragung von großer Bedeutung. Cäsiumisotope werden in der Krebsbehandlung verwendet. Weitere Felder der radioaktiven Cäsiumverbindungen sind die Sterilisation (Nahrung, Abfälle) (USGS). Cäsium verstärkt Hydrierungskatalysatoren (Lenntech).			KFE

Metall	Anwendungsbereiche	Metalleinsatz weltweit	Metalleinsatz USA	Diss.
Cer	Das Metall Cer wird zur Färbung von Gläsern und als Legierungsbestandteil von Stählen und Aluminium eingesetzt. Eine besonders wichtige Anwendung sind Autokatalysatoren (Ceroxid). Wichtig ist auch die Verwendung von roten Cer-Pigmenten als Farbstoff für Kunststoffe anstelle von Cadmium. Cer wird auch in Flachbildschirmen, Energiesparlampen und Compact-Disks verwendet. Spezielle Anwendungen liegen in der Reaktortechnik, Zündsteine für Feuerzeuge (Schröter et al.), Bogen- und Gaslampen (Gasglühkörper), Permanentmagneten und Glaspolituren.			FV
Chrom	Chrom wird vor allem zur Oberflächenbehandlung (Verchromung) und zur Herstellung von Ferro-Chrom-Stählen eingesetzt. Weitere Anwendungen sind Pigmente, Glasfärbung (grünes Glas), Gerbung und Katalysatoren (Rutherford: Chrom). Auch Videokassetten enthalten Chrom.	93 % Stahlindustrie; 3 % chemische Industrie; 3 % Gießerein (Sande); 1% Feuerfestmaterialien (Angerer et al. 2008)		ub
Cobalt	Das Metall wird vor allem in Stahllegierungen eingesetzt, da hierdurch temperaturbeständige und ferromagnetische Stähle gewonnen werden können. Besonders wichtig dabei sind Gasturbinen (v.a. Luftfahrt). Weitere wichtige Felder sind Schneidwerkzeuge (Carbide) und chemische Erzeugnisse.	30 % Stahllegierungen; 22 % Batterien; 11 % Katalysatoren; 11 % Hartmetalle (Schneidwerkzeuge); 9 % Pigmente; 8 % Chemikalien; 7 % Magnete; 2 % Sonstiges (Angerer et al. 2008)	2008: 45 % für Legierung von Flugzeuggasturbinen; 32 % Chemikalien; 14 % Metallprodukte; 9 % Carbide (Schneidwerkzeuge) (USGS 2008); 2006: 65 % für Stähle und andere metallische Nutzungen; 9 % für Carbide (Schneidwerkzeuge); 26 % für chemische Erzeugnisse (USGS 2006)	ub
Dysprosium	Das Metall wird mit weniger als 100 t pro Jahr nur in geringem Umfang hergestellt und genutzt. Das Metall wird in verschiedenen Legierungen, in Spezialmagneten und in der Kerntechnik verwendet (Rutherford: Dysprosium). Siehe auch seltene Erden.			KFV

Metall	Anwendungsbereiche	Metalleinsatz weltweit	Metalleinsatz USA	Diss.
Eisen	Eisen in Form von Stählen wird überwiegend für konstruktive Zwecke und im Verkehrswesen eingesetzt (Gebäude, Kraftfahrzeuge, Infrastrukturen). In EE-Produkten findet es sich neben Aluminium zu diesen Zwecken in größeren Mengen. Weiterhin ist Eisen in Transformatoren (zumeist als Ferrite) enthalten.		21 % Lagerhallen; 17 % Konstruktion; 13 % Verkehr und Kraftfahrzeuge; 2 % Behälter; 47 % Sonstiges (USGS 2008)	KFV
Erbium	Das Metall wird mit weniger als 100 t pro Jahr nur in geringem Umfang hergestellt und genutzt. Das Metall wird in der Kerntechnik und in Titanlegierungen eingesetzt sowie zum Färben von Gläsern und Emailen (Rutherford: Erbium). Weiterhin wird es in Katalysatoren und zum Polieren von Glas eingesetzt. Ebenso dient es der besseren Verarbeitung von Vanadium (Lenntech)			KFV
Europium	Das Metall wird mit weniger als 100 t pro Jahr nur in geringem Umfang hergestellt und genutzt. Es wird in der Reaktortechnik als Neutronenabsorber verwendet (Rutherford: Europium).			KFV
Gadolinium	Das Metall wird mit weniger als 100 t pro Jahr nur in geringem Umfang hergestellt und genutzt.			
Gallium	Gallium wird vor allem zur Herstellung von verschiedenen Halbleitern genutzt. Wichtige neue Anwendungen sind die Optoelektronik (Laserdioden, Photodetektoren), LED und Solarzellen. Auch in der Forschung wird in den USA viel Gallium eingesetzt.		66 % für IC; 20 % Optoelektronik (u.a. LED, PV, Laser-Dioden); 14% Forschung, Spezialstähle u.a. (USGS 2008)	FV-d
Germanium	Germanium wird vor allem zur Herstellung von verschiedenen Halbleitern genutzt (Transistoren, IC). Ein neues wichtiges Anwendungsfeld sind Solarzellen. Germaniumoxid erhöht die Brechzahl von Gläsern, weshalb es in Weitwinkelobjektiven und Infrarotgläsern eingesetzt wird. Von sehr großer Bedeutung ist die Verwendung von Germanium in Glasfasern im Bereich der Telekommunikation. Weitere Einsatzfelder sind Polymerkatalysatoren, Chemotherapie und Leuchtstoffe. Hochreines Gallium wird für Strahlungsdetektoren zur Sicherheitskontrolle auf Flughäfen eingesetzt werden.	35 % Glasfaseranwendungen; 30 % Infrarotanwendungen; 15 % Polymerkatalysatoren; 15 % Elektronik und PV; 5 % anderes (USGS 2008).	50 % Infrarotanwendungen; 30 % Glasfaseranwendungen; 15 % Elektronik und PV; 5 % Sonstiges (USGS 2008)	KFV
Gold	Gold wird vor allem zur Schmuckherstellung und als Goldreserve genutzt. Ein weiteres wichtiges Anwendungsfeld ist die Zahntechnik. Aufgrund seiner ausgezeichneten Leitfähigkeit findet es sich auch in elektrischen Kontakten und somit in EE-Bauteilen sowie in CDR.		84 % Schmuck; 10 % Dentalbedarf und anderes; 6 % Elektroindustrie (USGS: Gold)	KFV

Metall	Anwendungsbereiche	Metalleinsatz weltweit	Metalleinsatz USA	Diss.
Hafnium	Hafnium wird zur Herstellung von Spezialstählen verwendet, die u.a. in der Reaktortechnik eingesetzt werden (Rutherford: Hafnium). Im geringen Umfang wird es in der Beleuchtungstechnik und in EuE-Produkten verwendet.			ub
Holmium	Das Metall wird nur in geringem Umfang genutzt. Es wird in verschiedenen Legierungen für starke Magnete verwendet. Weiterhin soll es in der Reaktortechnik verwendet werden, da es thermische Neutronen einfangen kann.			FV
Indium	Indium wird vor allem für leitfähige und transparente Beschichtungen in Flachbildschirmen (LCDs)(Indium-Zinn-Oxid). Ein weiteres wichtiges und zunehmend bedeutendes Einsatzfeld sind Solarzellen (Lauermann 1998). Als Dotierungsmittel findet es sich in Halbleitern (Transistoren), LED und Infrarot-Detektoren. Ebenso wird es für Lötmittel und Legierungen verwendet.	84 % ITO-Beschichtungen (zumeist LCD); 8 % Legierungen; 6 % sonstiges; 2 % Halbleiter und elektronische Komponenten (Angerer et al. 2008)	70 % Beschichtungen (zumeist LCD); 12 % EuE-Bauteile (inkl. PV); 12 % Lötmittel und Legierungen; 6 % Forschung und anderes (USGS 2008)	FV-d
Iridium	Die mengenmäßig wichtigste Anwendung sind Katalysatoren zur Abgasreinigung. Ebenso wird es in elektronischen Anwendungen genutzt (Wilburn, o.J.). Das Metall härtet Platin und wird vielfach als Legierung eingesetzt (u.a. für das Ur-Meter). Darüber hinaus findet es aufgrund seiner chemischen Stabilität Anwendung in Laborgeräten der Chemie, der Chlor-Alkali-Elektrolyse (Elektrodenschutz) und als vielfältig einsetzbarer Katalysator. Osmium-Iridium-Stähle sind besonders hart und biegsam (Füllfedern, Kompassnadeln).	0,7 t EuE (2002) (Wilburn, o.J.: S.67)		KFV
Kalium	Kaliumsalze werden als Dünger verwendet. Andere Anwendungen von Kalium (z.B. Zuschlagsstoff für Gläser) fallen dagegen kaum ins Gewicht. Metallisches Kalium wird als Kühlmittel in Kernreaktoren verwendet.		85 % Düngemittel (Kaliumcarbonat) (USGS 2008)	FV-d

Metall	Anwendungsbereiche	Metalleinsatz weltweit	Metalleinsatz USA	Diss.
Kupfer	Das Metall Kupfer ist das wichtigste Metall zur Leitung von elektrischem Strom, da Kupfer sehr gute Eigenschaften aufweist wie elektrische Leitfähigkeit und Formbarkeit. Von Bedeutung ist auch die Legierungsbildung mit Zink und Zinn, die zu gut gießbaren und bearbeitbaren Formteilen führt. Weitere wesentliche Anwendungsfelder sind die Bereiche Bau (Rohre, Armaturen, Dachabdeckungen), Kraftfahrzeuge (Leitungen, Formteile), Maschinenbau (Guss- und Formteile in Maschinen) und Industrie (Rohre, Reaktoren und Armaturen). Messingprodukte werden auch im Haushalt häufig verwendet. Mengenmäßig wenig bedeutsame Verwendung sind die Landwirtschaft (Kupfersulfat) und Beschichtungen (z.B. Schiffsfarben). Die Verwendung von Kupfer ist jedoch sehr unterschiedlich in den verschiedenen Regionen. Beispielsweise wird in Europa und den USA mehr Kupfer im Gebäudebereich verwendet, in Asien hingegen vor allem für EuE-Produkte.	Angaben jeweils für USA/Europa/Asien: 43 %/40 %/15 % Gebäude; 12 %/8 %/15 % Verkehr; 9 %/7 %/11 % Konsumprodukte; 25 %/38 %/50 % EuE; 11 %/9 %/9 % Maschinen und Ausrüstung (Angerer et al. 2008)	51 % Gebäude; 19 % Elektrik; 10 % Transportmittel; 11 % Konsumprodukte; 9 % Industriemaschinen und Ausrüstung (sowohl Kupfer als auch Legierungen) (USGS 2008)	KFV
Lanthan	Das Metall wird nur in geringem Umfang eingesetzt. Als Oxid wird es zur Färbung von Gläsern und zur Herstellung von Speziallinsen (Infrarotlinsen, Kameralinsen Teleskope) verwendet. In geringen Mengen verbessert es die Formbarkeit von Stählen. Lanthanverbindungen dienen auch als Leuchtstoff in Bildröhren, Leuchtstofflampen und Energiesparlampen. Außerdem wird es als Kernmaterial von Lichtbogen-Kohleelektroden eingesetzt. In der Erdölindustrie dient es zur Stabilisierung von Zeolithkatalysatoren.			FV
Lithium	Die wichtigste Anwendung sind Lithium-Metall-Akkumulatoren. Lithiumcarbonat wird für Glasuren und als Flussmittel für Emaille genutzt. Darüber hinaus ist es für organische Synthesen von herausragender Bedeutung (Stearate in Waschmitteln und Kosmetika). Weitere Anwendungen sind Schmierfette, Lagermetalle (mit Lithium gehärtete Bleilager, Bahnmetalle) und Leichtmetalle für die Luft- und Raumfahrt (mit Aluminium). Auch in der Kältetechnik werden LiBr-Wassergemische als Arbeitsmittel verwendet. In der Medizin basieren einige Psychopharmaka auf Lithiumbasis. Aufgrund seiner metallischen Eigenschaften (leichtentzündlich) wird es als Metall nur sehr wenig verwendet, findet jedoch Anwendung in der Metallurgie (Entschwefelung, Entstickung, Desoxygenation, Entkohlung).	20 % Batterien; 20 % Keramik und Gläser; 16 % Schmierfette; 9 % Pharmazie und Polymere; 8 % Klimatechnik; 6 % Aluminiumherstellung; 21 % Sonstiges (USGS 2008)		FV-d
Lutetium				ub

Metall	Anwendungsbereiche	Metalleinsatz weltweit	Metalleinsatz USA	Diss.
Magnesium	Die wichtigsten Verwendungen von Magnesium sind feuerfeste Steine für Hütten- und Industrieprozesse (MgO) und korrosionsfeste Leichtmetalllegierungen mit Aluminium (Flugzeug- und Fahrzeugbau). Das Metall wird auch als Reduktionsagens zur Herstellung anderer Metalle (Zr, Cu, Cr, Ti, U, Ni) eingesetzt. In der Medizin wird MgO als Neutralisierungsmittel für Magensäure und MgSO ₄ als Wundpulver eingesetzt. Letzteres wird auch als Füllstoff für Papier und Gummi verwendet. Andere wichtige Verwendungen von Mg-Sulfaten sind Leichtbauplatten und Düngemittel.		43 % Al-Mg-Legierungen (Verpackungen, Kraftfahrzeuge u.a.); 37 % Gussstücke; 10 % Stahlindustrie (Entschwefelung); 10 % Sonstiges (USGS 2008)	KFV
Mangan	Das Metall wird vor allem für Stahllegierungen eingesetzt (USA: 24 % Konstruktionsstahl; 10 % Maschinenstahl; 10 % Verkehrsstahl). Weiterhin wird Mangan zur Herstellung von Trockenbatterien genutzt. Weniger wichtige Anwendungen sind der Ackerbau und die Viehzucht (Nahrungsergänzung, Düngemittel) sowie Farbstoff für Ziegelsteine.		44 % Stahlherstellung (USGS 2008)	ub
Molybdän	Das Metall wird vor allem zur Herstellung von hochfesten und hitzebeständigen Stählen (Turbinen) eingesetzt.		81 % Stahlherstellung (USGS 2008)	ub
Natrium	Die wichtigste Natriumverbindung ist Natriumchlorid, aus der Chlor hergestellt wird. Andere Natriumverbindungen wie das Carbonat, das Sulfat, das Sulfit u.a. sind bedeutende Hilfsmittel in chemischen Prozessen, der Zelluloseherstellung, als Füllstoff für Papier oder die Sodaverwendung bei der Glasherstellung. Natrium wird im großen Umfang auch in Seifen verwendet sowie in der Textilherstellung. Im Verhältnis hierzu fallen die übrigen Einsätze von Natrium kaum ins Gewicht.		Natriumsulfat: 46 % Seifen und Detergentien; 13 % Papierherstellung; 13 %; Textilherstellung; 12 % Gläser; 7 % Teppichreiniger; 11 % Sonstiges (USGS 2008). Natriumcarbonat: 50 % Glasherstellung; 29 % Chemikalien; 9 % Seifen und Detergentien; 4 % Nahrung; 3 % Sonstiges; 2 % Papierherstellung; 1 % Wasserbehandlung (USGS 2008)	FV-d

Metall	Anwendungsbereiche	Metalleinsatz weltweit	Metalleinsatz USA	Diss.
Neodym	Die wichtigste Anwendung von Neodym sind Legierungen mit Eisen und Bor zur Herstellung von Permanentmagneten, die in Fahrzeugen, in Datenspeichern und Lautsprechern eingesetzt werden. Neodym wird als Leuchtstoff in Fernsehern, Leuchtstofflampen und Energiesparleuchten eingesetzt. In Feuerzeugen ist es im Feuerstein enthalten. Neodym wird zur Färbung von Gläsern und Emailen eingesetzt. In Schweißbrillengläsern absorbiert es das gelbe Licht. In Sonnenbrillen wird es wegen seiner violetten Färbung eingesetzt.			FV
Nickel	Nickel wird vor allem in der Stahlherstellung eingesetzt (Edelstahl, Stahlegierungen) und in anderen Legierungen (Neusilber mit Kupfer und Zink, Monell-Metall mit Kupfer oder Konstantan). Durch Vernickelung werden Stähle oberflächengeschützt. Als Legierung findet es sich sehr häufig in EE-Bauteilen. Ebenso wird es in Münzen verwendet. Wichtig ist auch seine Verwendung in Nickel-Cadmium-Batterien (Akkus). Der Anteil für EE-Produkte und -bauteile belief sich in 2006 in den USA auf ca. 13 % des Nickelverbrauchs. In 2007 war der Endverbrauch für Nickelprodukte (v.a. Stähle) wie folgt: 30 % Verkehr, 15 % chemische Industrie, 10 % elektrische Ausrüstung, 9 % Konstruktion, 8 % Metallprodukte, 8 % Haushaltsvorrichtungen, 7 % Petroleumindustrie.		86 % Stahlherstellung; 10 % Vernickelung; 4 % Sonstiges (USGS 2008)	ub
Niob	Niob wird vor allem als Legierungsbestandteil für korrosionsfeste Stähle verwendet. Niobmetall und Nioblegierungen werden in der Luft- und Raumfahrt genutzt. Auf dem US-amerikanischen Markt wird fast 100% für die Stahlherstellung eingesetzt (USGS: Niob). Mit Germanium zusammen wird es zur Herstellung von Supraleitern eingesetzt (Rutherford: Niob). Aufgrund seiner elektrischen Eigenschaften wird es auch in Kondensatoren verwendet.		100 % Stahlherstellung (USGS 2008)	ub
Osmium	Das Metall wird vor allem zur Härtung von Stählen eingesetzt. Einsatzfelder sind Injektionsnadeln, Federn von Füllfederhaltern und Schreibkugeln von Kugelschreibern, Kompassnadeln und mechanische Bauteile hochwertiger Uhren. Früher wurde es auch für Glühdrähte eingesetzt (Rutherford: Osmium). Für einige chemische Reaktionen wird es als Hydrierungskatalysator verwendet. In der Medizin wird eine Platin-Osmium-Legierung für Herzschrittmacher und -klappen verwendet.			KFV

Metall	Anwendungsbereiche	Metalleinsatz weltweit	Metalleinsatz USA	Diss.
Palladium	Palladium wird vor allem in der Zahntechnik als Legierung mit Silber eingesetzt. Es dient weiterhin in der chemischen Industrie als Hydrierungskatalysator (u.a. Fetthärtung), da es leicht Hydride mit Wasserstoff bildet. Im elektronischen Sektor wird Palladium für Kondensatoren und Widerstandskörper genutzt (Wilburn, o.J.). Platinmischungen sowie Platin-Rhodium-Mischungen werden für elektrisch-resistente Heizelemente genutzt, die sich in Geräten wie Feuerzeugen, Impulsdrahtzündern, Nylonscheren, Schweißgeräten, Gewinde für Schalldämpfer sowie medizinische Geräte finden.	158 t Kfz-Katalysatoren; 22,1 t Palladium für EuE; 8,1 t Schmuck (2002) (Wilburn, o.J.: S.67)		KFV
Platin	Das Metall Platin wird in großem Umfang zur Herstellung von Schmuck verwendet, auch in legierter Form. Ein weiteres wichtiges Anwendungsfeld von Platin sind Katalysatoren zur Abgasreinigung in Kfz. Auch elektrische Komponenten, Elektroden und Thermoelemente enthalten teilweise Platin. Besonders häufig wird es in Festplatten genutzt, weshalb auch Computer, Spielkonsolen und Navigationsgeräte Platin enthalten.	88 t Schmuck; 78 t Kfz-Katalysatoren; 11,8 t EuE (2002) (Wilburn, o.J.: S.67)		KFV
Platingruppenmetalle (Platin, Palladium, Rhodium, Ruthenium, Osmium, Iridium)	PGM werden als Katalysatoren in der Industrie (Hydrierung, Salpetersäureherstellung, Silikonherstellung, Luftreinigung, CO-Abbau, Petroleumkatalysatoren für Benzinraffination), im Fahrzeugbau (Autokatalysatoren) und für Schmuckwaren genutzt. Weiterhin finden sie in legierter Form Verwendung in der Dentaltechnik. Auch in elektronischen Bauteilen, Komponenten und Computerfestplatten werden PGM eingesetzt. Ein mögliches wichtiges Zukunftsfeld sind Brennstoffzellen, in denen PGM die Redoxreaktion katalysieren. Platin und Rhodium werden vor allem für elektrische Anwendungen und Iridium, Palladium und Ruthenium für elektronische Anwendungen genutzt. Besonders wichtig ist Platin bei Festplatten, beispielsweise Spielkonsolen. Auch Navigationsgeräte enthalten somit Platin. Nach Wilburn (o.J.) wurden ca. 22,1 t Palladium, 11,8 t Platin, 4,5 t Ruthenium, 0,7 t Iridium und 0,2 t Rhodium für EuE verbraucht (Wilburn, o.J.: S.67).			ub

Metall	Anwendungsbereiche	Metalleinsatz weltweit	Metalleinsatz USA	Diss.
Praseodym	Das Metall Praseodym wird in Legierungen für Permanentmagneten und in Elektroden von Lichtbogenlampen verwendet. Magnesiumlegierungen mit Praseodym werden in Flugzeugturbinen verwendet. Einige seiner Verbindungen werden als Leuchtstoffe in Bildröhren, Leuchtstofflampen und Energiesparleuchten verwendet. Die Salze werden zur Gelbfärbung von Gläsern und Emailen verwendet. Der Einsatz von Praseodym in Feuersteinen von Feuerzeugen ist möglicherweise die wichtigste Verwendung (Lenntech, Rutherford).			FV
Promethium	Das zu den Lanthaniden gehörende Metall Promethium fällt bei der Uranspaltung an. Es wird in „Atombatterien“ für Satelliten und Herzschrittmachern genutzt (Rutherford: Promethium, Lenntech).			KFV
Quecksilber	Quecksilber ist ein giftiges Metall, weshalb seine Verwendung in den Industriestaaten nur in wenigen Feldern erfolgt. Die wichtigsten Verwendungen von Quecksilber sind die Dentaltechnik (Amalgam), Knopfzellen (inzwischen in vielen Ländern verboten) sowie die Chlor-Alkali-Elektrolyse (auslaufende Produktionsform). Quecksilber ist auch in einigen Pestiziden enthalten. Daneben wird es auch in der (illegalen) Goldwäsche eingesetzt, z.B. in Südamerika. Geringe Mengen an Quecksilbersalzen werden in Reinigungsmitteln, Hautaufhellungscremes und Seifen verwendet, aber auch im Feuerwerk.			FV
Rhenium	Rhenium wird vor allem für Katalysatoren (Reforming-Prozesse der Erdölindustrie zur Herstellung von Benzin) und zur Herstellung von hochfesten Spezialstählen eingesetzt, wie sie in Turbinen erforderlich sind. Rhenium findet sich auch in Anwendungen mit hoher Temperaturbelastung wie z.B. in Heizelementen, Elektroden für Ionisierungen und Thermoelementen. Andere Anwendungen sind Elektromagnete, Kontakte sowie Schutzschichten für Metalle.		20 % Katalysatoren der Erdölindustrie; 60 % Turbinenstähle (USGS 2008)	ub

Metall	Anwendungsbereiche	Metalleinsatz weltweit	Metalleinsatz USA	Diss.
Rhodium	Rhodium wird überwiegend dort genutzt, wo hohe Temperaturen und aggressive Medien vorliegen. Das Metall wird vor allem für Katalysatoren zur Abgasreinigung in Kfz und im Monsanto-Prozess (Essigsäureherstellung) eingesetzt. Weiterhin wird es für hochreflektierende Spiegel bzw. Schweißgeräte eingesetzt (Rutherford: Rhodium). Auch in einigen elektrischen Anwendungen wird Rhodium genutzt (Wilburn, o.J.). Andere Anwendungen sind hochfeste und temperaturstabile Kupplungen, Zündkerzen für Flugzeuge, Brennelemente von Heizungen, Lager oder widerstandsfähige Drähte. Platin-Rhodium-Legierungen werden für elektrisch leitende und temperaturstabile Heizelemente genutzt, die sich in Geräten wie Feuerzeugen, Impulsdrahtzündern, Nylonscheren und Schweißgeräten finden. Ebenso wird es für Gewinde in Schalldämpfern sowie in medizinischen Geräten eingesetzt.	85 % für Autokatalysatoren (Lenntech, o.J.); 0,2 t EuE (2002) (Wilburn, o.J.: S.67)		FV-d
Rubidium	Das Metall Rubidium wird in sehr geringem Umfang verwendet. Rubidium wird in Elektro- und Elektronikbauteilen verwendet (Glasfasertechnik, Photozellen, Vakuumröhren). Es wird auch in Nachtsichtgeräten, als Standard für spektrochemische Verfahren (AAA) und bei der DN/A-Analyse genutzt. Rb-82 wird für Herzuntersuchungen verwendet. Im Feuerwerk wird es für rote Effekte genutzt. Mögliche Zukunftsanwendungen sind Ionentriebwerke und Arbeitsmittel in Gasturbinen.			FV
Ruthenium	Das Metall Ruthenium wird vor allem für Katalysatoren verwendet z.B. zur Entfernung von Schwefelwasserstoff in Erdöl-Raffinerien, zur Herstellung von Ammoniak oder von Essigsäure. Ruthenium wird auch in elektronischen Anwendungen für Kontakte und Chip-Widerstände verwendet (Wilburn, o.J.: S.64). Andere Anwendungen sind Elektroden zur Chlorherstellung und die Korrosionsverbesserung von Titan. Ruthenium wird aufgrund seiner härtenden Eigenschaften häufig in geringen Mengen zur Legierung eingesetzt. Es absorbiert Licht über das sichtbare Spektrum hinaus, so dass es für die Solarforschung interessant sein könnte.	50 % Elektroindustrie; 40 % chemische Industrie (Lenntech); 4,5 t für EuE (2002) (Wilburn, o.J.: S.67)		ub
Samarium	Samarium wird eingesetzt zum Dotieren von Laserkristallen, zur Herstellung von Spezialgläsern, von Keramiken und von Neutronenabsorbern in Kernreaktoren (Rutherford: Samarium). Samariumkatalysatoren werden bei der Dehydrierung und Dehydrogenierung von Ethanol eingesetzt. Samarium-Cobalt-Legierungen bilden Permanentmagnete. Samarium wird auch in Elektroden von Lichtbogenlampen verwendet.			FV

Metall	Anwendungsbereiche	Metalleinsatz weltweit	Metalleinsatz USA	Diss.
Scandium	Scandium wird vor allem als Legierungsmetall für Aluminium genutzt, um hochstabile Sportgeräte und bruchfeste Leichtmetalle für die Luft- und Raumfahrt herzustellen. Es wird zudem für leuchtstarke Halogenlampen, in Lasern und für Magnetspeicher genutzt. Als Leuchtmittel findet es sich in Fernsehern, Leuchtstoffröhren und Energiesparlampen. Scandium wird auch zur Glaspolitur verwendet.			ub
Selen	Selen wird in der Halbleitertechnik und für Solarzellen eingesetzt. Seine guten photoelektrischen Eigenschaften führen auch zur Verwendung in der (älteren) Kopiertechnik (Belichtungstrommeln). Andere Verwendungen sind die Vulkanisierung von Gummi und die Keramik- und Glasherstellung (Entfernung des Grünstichs durch Eisen bzw. Minderung der Wärmedurchlässigkeit von Glasfassaden). Als Pigment mit Cadmium erzeugt es eine rubinrote Farbe z.B. in Ampeln. Als Legierungszusatz ermöglicht es die bessere Verarbeitung von Kupfer, Blei und Stahllegierungen. Ebenso dient es als Zusatz zur Verbesserung von metallischen Beschichtungsverfahren und zur Mangangewinnung. Selen wird auch in Anti-Schuppenshampoos und als Nahrungsergänzungsmittel bzw. in der Landwirtschaft bei selenarmen Böden verwendet.	35 % Glasherstellung; 20 % Chemikalien und Pigmente; 12 % Elektronik und Kopiertechnik; 33% Sonstiges; (2003)(Matons und George 2005)		FV-d
Seltene Erden	Zu den seltenen Erden zählen Cer, Praseodym, Neodym, Promethium, Samarium, Europium, Gadolinium, Terbium, Dysprosium, Holmium, Erbium, Terbium, Ytterbium und Lutetium. Die wichtigsten Minerale der Seltenen Erden sind Bastnäsite (CeFCO_3) und Thortveitit ($(\text{Y,Sc})_2\text{Si}_2\text{O}_7$). Der Einsatz erfolgt nur in kleinen Mengen, dafür aber in sehr vielen Anwendungsgebieten. Die wichtigsten sind Kfz-Abgaskatalysatoren, Katalysatoren der Erdölindustrie, metallische Zusätze für Legierungen, Glasreiniger und Leuchtstoffe (Bildröhren, Monitore, Radarschirme etc.). Ein Vergleich der Verwendungsdaten für frühere Jahre zeigt, dass die eingesetzten Mengen innerhalb weniger Jahre um 50 % schwanken können.		25 % Kfz-Abgas-katalysatoren; 22 % Erdölindustrie/Katalysatoren; 20 % Legierungen; 11 % Glasreiniger und Keramik; 10 % Leuchtstoffe; 10 % Magnete; 3 % Medizin und Laser (2006) (USGS 2008)	FV-d

Metall	Anwendungsbereiche	Metalleinsatz weltweit	Metalleinsatz USA	Diss.
Silber	Silber wird vor allem für Schmuckgegenstände, Münzen, Bestecke und Fotochemikalien genutzt. Aus Schmuckgegenständen wird es inzwischen sehr häufig rezykliert (Rutherford: Silber). Mit der Ausweitung der digitalen Fotografie und modernen Printverfahren wird auch die Anwendung für Fotochemikalien zurückgehen. Weiterhin werden größere Mengen von Silber auch in EE-Produkten eingesetzt. Silber wird in geringen Mengen auch in Batterien, Solarzellen, kleinsten Funkantennen (RFID für Dokumente) und Spiegeln verwendet. In der Medizin wird es im Amalgam (Hg-Ag) und für sterilisierende Wundverbände genutzt, sowie zur Wasserdesinfektion und auf Telefongehäusen (?), da es bakterizid wirkt.	31 % Schmuck und Silberwaren; 22 % Elektrik und Elektronik; 16 % Photographie; 12 % Sonstiges; 8 % Exchange Traded Funds; 5 % Katalysatoren; 4 % Hartlotlegierungen; 1 % Münzen (2007) (Fortis 2008)		KFV
Strontium	Strontiumoxid wird vor allem als Glasbildner in Gläsern, z.B. für Bildschirmgläser von Fernsehgeräten und für Keramiken eingesetzt. Weitere Anwendungen sind Magnete, Legierungen, Pigmente, Füllstoffe und die Zinkherstellung. Auch für die Pyrotechnik wird Strontium verwendet. In früheren Jahren war in den USA der wichtigste Einsatz Bildröhrenglas.		43 % Pyrotechnik; 26 % Eisenoxid-Keramik-Magnete; 10 % Legierungen; 7 % Pigmente und Füllstoffe; 6 % Zinkherstellung; 8 % Sonstiges (USGS 2008)	FV-d
Tantal	Die wichtigste Verwendung von Tantal ist die Nutzung der kapazitiven Eigenschaften in miniaturisierten Kondensatoren für kleine Elektrogeräte wie Handys, Pager, Laptops, Hörgeräte, Navigationsgeräte u.a. Weiterhin wird Tantal in größeren Mengen in Form von Carbiden für Schneidwerkzeuge in der Metallbearbeitung eingesetzt. In der Medizin werden Tantallegierungen für Implantate verwendet.	50-60 % EuE bzw. Kondensatoren (TIC, USGS 2008, o.J.)		FV-d
Tellur	Das Halbmetall Tellur wird vor allem als Legierungsbestandteil zur besseren Bearbeitung für Stähle und Kupfer verwendet. Es härtet auch Blei und verhindert dessen Ermüdung. Weiterhin wird es als Katalysator für die Gummiherstellung und bei der Faserherstellung genutzt. In EuE-Bauteilen findet es sich in Photozellen und thermoelektrischen Bauteilen. Auch in PV-Zellen wird es eingesetzt. Eine weitere Anwendung ist die Färbung von Glas und Keramik.			KFV
Terbium	Terbium wird vor allem in der Lasertechnologie, für Halbleiter und für Speichermedien genutzt. Als Leuchtstoff findet es sich in Bildröhren. Weiterhin wird es in Hochtemperatur-Brennstoffzellen genutzt.			KFV

Metall	Anwendungsbereiche	Metalleinsatz weltweit	Metalleinsatz USA	Diss.
Thallium	Thallium ist hochgiftig, weshalb es auch als Rattengift eingesetzt wurde. Thallium wird in Hochtemperatur-Supraleitern, als Filter für die Mobilfunkkommunikation und in speziellen EE-Bauteilen eingesetzt. Thalliumlinsen werden in der Infrarottechnik und Akkusto-Optik verwendet. In Gläsern erhöht Thallium den Brechungsindex. Im Bergbau werden Thalliumadditive zur Trennung von Mineralien in Schwimm-Sink-Verfahren eingesetzt. Isotope von Thallium werden bei spektrometrischen Herzuntersuchungen eingesetzt.			KFV
Thulium	Thulium wird nur in Spezialbereichen eingesetzt, z.B. als Strahlenquelle für transportable Röntgengeräte (Rutherford: Thulium). Siehe auch seltene Erden.			KFV
Titan	Das Metall Titan wird in Form von Metalllegierungen in sehr vielen konstruktiven und verkehrstechnischen Bereichen eingesetzt, vor allem wegen seiner chemischen, thermischen und mechanischen Eigenschaften. Besonders wichtige Eigenschaften sind sein geringes Gewicht und seine Korrosionsbeständigkeit. Insbesondere für die Luft- und Raumfahrt ist es ein wichtiger Konstruktionswerkstoff. Schätzungsweise 76% des gesamten Einsatzes in den USA gelangen in diesen Bereich. Andere Anwendungsbereiche sind die Rüstungsindustrie, chemische Industrie, Sportwaren, Energieerzeugung und Meerestechnik. In wesentlich größeren Mengen wird es jedoch als Färbemittel (Titanweiß) bzw. als weißer Füllstoff verwendet.		57 % Farben; 26 % Kunststoffe (Farben); 13 % Papier (weißer Füllstoff); 4 % Sonstiges (TiO ₂ -Verwendung, USGS 2008). 76 % Luft- und Raumfahrt; 24 % Sonstiges (Titan, USGS 2008)	FV-d
Vanadium	Vanadium wird vor allem zur Herstellung hochfester Stähle eingesetzt. Ein weiterer wichtiger Einsatz sind Katalysatoren zur Herstellung von Schwefelsäure und Maleinsäure.		91 % Stahlindustrie; 9 % Sonstiges (Katalysatoren) (USGS 2008)	ub
Wolfram	Wolfram wird vor allem in Form von Carbiden zur Herstellung von Schneidwerkzeugen eingesetzt. Ein weiteres wichtiges Anwendungsfeld ist die Herstellung von hochfesten und hitzebeständigen Stählen. Weitere Anwendungen sind Elektroden, Kabel, Schweißtechnik, Wärmeerzeugung und Chemikalien. Wolfram wird für Glühdrähte und zahlreiche EuE-Anwendungen in geringem Umfang genutzt.		50 % Carbide; 50 % Sonstiges (USGS: Tungsten).	FV-d
Ytterbium	Ytterbium wird für rostfreie Spezialstähle genutzt. (Rutherford: Ytterbium). Auch in der Zahnmedizin werden Ytterbiumlegierungen verwendet. Ytterbium wird zudem als Leuchtstoff und für keramische Kondensatoren verwendet.			KFV

Metall	Anwendungsbereiche	Metalleinsatz weltweit	Metalleinsatz USA	Diss.
Yttrium	Yttrium wird als Legierungsmetall in Kombination mit einigen Metallen (Aluminium, Magnesium, Stahl) verwendet. Yttrium-haltige Werkstoffe weisen schon bei Temperaturen von -180°C Supraleitfähigkeit auf (Rutherford: Yttrium). Yttriumoxid ist ein wichtiger Leuchtstoff in Bildröhren, was vermutlich der wichtigste Einsatz ist. In Gläsern erhöht es die Hitze- und Schlagfestigkeit. Y-Oxid wird auch in Kameralinsen genutzt. Ebenso findet es sich in einigen EuE-Bauteilen. Weitere Anwendungen finden sich in der Landwirtschaft, chemische Industrie, der Gummiindustrie, aber auch im Bereich Farben (Rostschutzfarben).		84 % Lampen und Kathodenstrahlröhren (Bildröhren); 7 % Elektronik; 7 % Keramik; 2% metallurgische Verwendung	FV-d
Zink	Das Metall Zink wird vor allem zum Verzinken von Eisen (Oberflächenbehandlung) verwendet. In Messing (Legierung mit Kupfer) findet es breite Anwendungsfelder im Maschinen- und Apparatebau sowie in Kraftfahrzeugen und in Armaturen. Weiterhin wird es in Batterien (Zn-Kohle-Batterien) verwendet (Rutherford: Zink). Auch in vielen EE-Bauteilen wird Zink eingesetzt.		55 % Galvanisierung, 21 % Legierungen, 16 % Messing und Bronzen, 8 % Sonstiges (USGS 2008)	FV-d
Zinn	Zinn wird vor allem zur Herstellung von Weißblech (Dosen), Bronzen und Stanniol verwendet. Als Bestandteil der Bronzen findet sich Zinn in nahezu allen größeren Produkten. Im IuK-Bereich dient es als Lötzinn (Rutherford: Zinn). Ebenso wird es in Solarzellen eingesetzt (ITO).	50 % Lote; 18 % Weißblech; 14 % Chemikalien; 6 % Legierungen , 12 % Sonstiges (Angerer et al. 2008)	26 % Dosen und Verpackungen; 24 % Elektrik; 10 % Konstruktion; 10 % Verkehrswesen; 30 % Sonstiges (USGS 2008)	FV-d
Zirkon	Zirkon wird als Legierungsmetall für korrosionsfeste Stähle und zusammen mit Niob für Supraleiter eingesetzt. Wichtige Anwendungsfelder von Zr-Oxid sind Schmuck (Zirkonia), Keramik sowie feuerfeste Erzeugnisse. Zirkon wird als Metall vor allem in der Reaktortechnik eingesetzt (Brennstabumhüllungen).			FV

10.3 Anhang 3 – Einsatz von Metallen in ausgewählten Anwendungsbereichen

Tab. 10-4: Einsatz von Metallen in den Anwendungsbereichen Elektro- und Elektronikprodukte sowie Informations- und Kommunikationstechnologie

Metall	Einsatzbereiche in den Branchen EuE und IuK
Aluminium	In Elektrogeräten wie Fernseher oder Computer wird Al zumeist in größeren Mengen für konstruktive Zwecke verwendet. Aluminiumoxid ist als Glasbildner in Bildröhren vorhanden (Behrendt 1998). Aluminiummetall, Aluminiumfolie oder Al-Oxide werden vielfach in Kondensatoren bzw. als Bechermaterial verwendet (Elko: Kondensatoren).
Antimon	Antimonoxid findet sich als Zusatz in Bildröhrenglas. Außerdem findet es in der Halbleitertechnik sowie in Photozellen Anwendung (Kreibich 2004).
Arsen	Arsen wird zur Dotierung bei der Halbleiterherstellung eingesetzt z.B. in IC, Leuchtdioden und Fotowiderständen (Elko: LTR-Fotowiderstände). Darüber hinaus wird es als Legierungsmetall in Bleibatterien eingesetzt. Arsenoxid findet sich als Zusatz in Bildröhrenglas sowie in Leuchtstoffen. In Solarzellen können die Halbleitereigenschaften auch durch Arsendotierung erzielt und in Tandemzellen genutzt werden. Die Elektroindustrie verwendet hochreines Arsen (99.9999 %) für Gallium-Arsenid- Halbleiter, die für Solarzellen, Raumfahrt und Telekommunikation verwendet werden (USGS).
Barium	Barium wird in Gläsern und Keramiken als Oxid eingesetzt wie z.B. für Bildschirmgläser von Fernsehgeräten.
Beryllium	Kupferleitungen mit Berylliumlegierungen werden vor allem dort eingesetzt, wo Kabelbewegungen oder Schwingungen auftreten. Beryllium wird auch als Leuchtstoff in Fernsehgeräten eingesetzt (Behrendt et al. 1998).
Bismut	In IuK-Produkten wird Bismut-Oxid in Keramiken oder Gläsern eingesetzt. In EE-Bauteilen wird es als Bleilegierung in Drosseln eingesetzt. Bismut wird auch als Leuchtstoff für Fernsehgeräte eingesetzt (Behrendt et al. 1998).
Blei	Blei wird zur Ummantelung von Elektrokabeln genutzt (Rutherford: Blei). Mengenmäßig relevant ist Bleioxid in Bildschirmgläsern von Fernsehgeräten (Behrendt et al. 1998). Als Lötzinn (SbPb) wird es in allen Elektrogeräten eingesetzt. Eine Analyse von Computern ergab, dass in Rechnern ca. 30 g und in Bildschirmen ca. 17 g Blei (hierbei ohne Bildschirmglas) verwendet wurden (Soldara 1995). Fotowiderstände können PbS oder PbSe enthalten (Elko: LTR-Fotowiderstände). Gemäß der RoHS-Richtlinien dürfen einige Metalle, darunter auch Blei, seit Juli 2006 nicht mehr eingesetzt werden. Kyocera zum Beispiel hat aufgrund der RoHS-Richtlinie schon in 2004 bleifreie Displays für Industriekunden auf den Markt gebracht.
Cadmium	In Elektrobauteilen mit hohen Sicherheitsstandards (Bahntechnik) wird Cadmium teilweise aufgrund der erhöhten Sicherheitsanforderungen verwendet. Cadmium wird auch als Leuchtstoffe für Fernsehgeräte eingesetzt (Behrendt et al. 1998). Darüber hinaus wird Cadmium auch in Cadmium-Tellurid-Solarzellen verwendet (Lauermann 1998). Fotowiderstände können CdS enthalten (Elko: LTR-Fotowiderstände). Gemäß der RoHS-Richtlinien dürfen einige Metalle, darunter auch Cadmium, seit Juli 2006 nicht mehr in Elektro- und Elektronikprodukten eingesetzt werden.
Calcium	Calciumoxid wird als Glasbildner in Bildschirmgläsern von Fernsehgeräten eingesetzt (Behrendt et al. 1998).

Metall	Einsatzbereiche in den Branchen EuE und IuK
Cäsium	Cäsium wird aufgrund des Photoeffekts für Nachtsichtgeräte und photoelektrische Zellen eingesetzt (Rutherford: Cäsium, USGS: Cesium). Cäsium wird auch in Photozellen beispielsweise von Fernsehkameras eingesetzt (Kreibich 2004).
Cer	Ceroxid findet sich als Zusatz in Bildröhrenglas und wird auch in der Lasertechnologie eingesetzt. Weitere Anwendungen sind Flachbildschirme und Compact-Discs (siehe auch seltene Erden).
Chrom	In einigen Herstellungsprozessen von PV-Zellen werden Chromate eingesetzt. NTC-Heißleiter (temperaturabhängige Halbleiterwiderstände) enthalten Chromate (Elko: NTC-Heißleiter). Gemäß der RoHS-Richtlinien dürfen einige Metalle, darunter auch sechswertiges Chrom, seit Juli 2006 in nicht mehr in Elektro- und Elektronikprodukten eingesetzt werden.
Cobalt	Cobalt wird aufgrund seiner ferromagnetischen Eigenschaften häufig in Generatoren und Elektromotoren eingesetzt (Rutherford: Cobalt). Cobalt wird auch als Leuchtstoff in Fernsehgeräten eingesetzt (Behrendt et al. 1998).
Dysprosium	
Eisen	Eisen findet sich in Transformatoren (Ferrite) und vielen anderen EE-Bauteilen (Spulen, Relais)(Elko: Spulen). Eisenoxid findet sich als Zusatz in Bildröhrenglas.
Erbium	Erbium wird als Dotierungsmaterial für Faser-Verstärker bei Lichtwellenleitern eingesetzt (Elektro: Lichtwellenleiter) (siehe auch seltene Erden).
Europium	Europium wird für extrem dünne Schichten von Supraleiterlegierungen genutzt. In Fernsehern wird es in Form von Eu-dotiertem Y_2O_2S als Leuchtstoff eingesetzt (Behrendt et al. 1998, Ruby, o.J.). Eu-dotiertes Y_2O_3 wird in Energiesparlampen eingesetzt (Ruby, o.J.) (siehe auch seltene Erden).
Gadolinium	Gadolinium findet Verwendung in Elektronikbauteilen, Magneten, in der Magnetooptik und der Neutronenradiographie (Rutherford: Gadolinium). Tb-Gd $_2$ O $_2$ S wird als grüner Leuchtstoff für Radarbildschirme eingesetzt (Ruby, o.J.) (siehe auch seltene Erden).
Gallium	Gallium wird vor allem zur Herstellung von verschiedenen Halbleitern (z.B. IC mit Galliumarsenidphosphid und Leuchtdioden mit Galliumarsenid oder -phosphid) eingesetzt (Rutherford: Gallium; Elko: LED). Darüber hinaus ist es inzwischen ein wichtiges Metall für die Optoelektronik und für Solarzellen. Galliumarsenid-Solarzellen haben einen hohen Wirkungsgrad und werden wegen ihrer Strahlungsresistenz an Satelliten eingesetzt. Sie können zudem zum Bau von Tandemsolarzellen (Doppelschichtzellen) verwendet werden (Lauermann 1998). Gallium wird zudem als Dotierungsmaterial für Halbleiter z.B. in IC eingesetzt.
Germanium	Germanium findet sich in Transistoren, Gleichrichtern, Tunneldioden und Fotowiderständen (Rutherford: Gallium; Elko: Halbleiter, Widerstände).
Gold	Gold findet sich in Form dünner Schichten auf CDR's (Eurometaux, o.J.). Zur mengenmäßigen Anwendung in Mobiltelefonen: siehe Platin
Hafnium	Einsatzgebiete von Hafnium sind Hochdruckglühlampen, in Form von Hafniumnitrid als Elektrode in Vakuumröhren und in Form von Hafniumoxid in der Halbleiterproduktion (Elektro: Hafnium).
Holmium	In IuK-Produkten wird Holmium in Farbfernsehgeräten als Leuchtstoff eingesetzt (Rutherford: Holmium). Holmium wird für Magnetblasenspeicher und Leuchtstofflampen verwendet (siehe auch seltene Erden).

Metall	Einsatzbereiche in den Branchen EuE und IuK
Indium	Indium wird in vielfältiger Weise in IuK-Produkten genutzt wie z.B. für Flüssigkristall-Displays und Flachbildschirme, da Indiumzinnoxid lichtdurchlässig und stromleitend ist, so dass es als „Leitungsdraht“ auf Solarzellen oder LCDs verwendet werden kann, ohne die Sichtbarkeit zu beeinflussen. Weitere Anwendungen sind leistungsstarke Transistoren (USGS: Indium), IC auf Indiumarsenidphosphid-Basis, Tunnelioden sowie Leuchtdioden (Al-Ga-In-Phosphat, In-Ga-Nitrogen, siehe Elko: Halbleiter). Darüber hinaus wird es in elektroluminiszenten Lampen, Halbleitern für Infrarot-Detektoren und die Photovoltaik eingesetzt. Indium wird in der Halbleitertechnik als Dotierungsmaterial eingesetzt. Daher können beispielsweise Photowiderstände InAs und Feldplatten Indiumantimonid enthalten (Elko: LTR-Fotowiderstände/Feldplatten). Indium wird auch in Hallsonden zur Messung von Magnetfeldern verwendet. In Solarzellen findet es Einsatz in Kupfer-Indium-Diselenid-Dünnschichtzellen (Lauermann 1998).
Iridium	Iridium wird in Thermoelementen für den Einsatz bei hohen Temperaturen verwendet (Elektro: Thermoelemente).
Kalium	Kaliumoxid wird in Bildröhren als Glasbildner eingesetzt (Behrendt et al. 1998).
Kupfer	Kupfer wird vor allem für Leitungsdrähte und Kabel eingesetzt. Weiterhin wird es in Spulen und Drosseln, Transformatoren, Elektromotoren und Generatoren genutzt. Fernsehgeräten enthalten bis zu ca. 3 % Kupfer (Behrendt et al. 1998), in Computern sind es 5-7 % und in Monitoren bis zu 8 % (jeweils Gewichtsprozent) (Soldner 1995). Zur mengenmäßigen Verwendung von Kupfer in Mobiltelefonen: siehe Platin. In der Kommunikationstechnik kann Kupfer bei der leitungsgebundenen Signalübertragung durch Siliziumoxid (Glasfasern) ersetzt werden.
Lanthan	Lanthan wird in Thermistoren zur Vermeidung von Überhitzung eingesetzt (Ruby, o.J.). Lanthan wird auch in Elektroden von Ni-Metallhydrid-Akkus eingesetzt.
Lithium	Lithium wird als Oxid in geringen Mengen in Bildröhrenglas eingesetzt. Die wichtigste Anwendung in IuK-Produkten sind Li-Ionen-, Lithium-Polymer- und Lithium-Metall-Akkus.
Lutetium	Lutetium wird in Szintillator-Kristallen für die Positronen-Emissions-Tomographie verwendet. Eines der prominentesten Beispiele ist mit Cer dotiertes Lutetiumoxyorthosilikat (LSO).
Magnesium	Magnesium wird in vielen EE-Bauteilen eingesetzt. Magnesium-Oxide werden in Bildröhren genutzt.
Mangan	Für die IuK-Industrie ist Mangan bei der Herstellung von Trockenbatterien und Akkumulatoren von Bedeutung (Alkali-Mangan-Zellen).
Molybdän	In Lampen wird es für Glühfäden sowie als Katalysator eingesetzt (Rutherford: Molybdän). In elektronischen Bauteilen findet es Verwendung in SMD-Dioden (Behrendt et al. 1998).
Natrium	Natriumoxid findet sich als Glasbildner in Bildröhren (Behrendt et al. 1998).
Neodym	In speziellen EE-Produkten findet sich Neodym in Neodym-Lasern. Neodym wird auch als Leuchtstoff in Farbfemseherröhren und Leuchtstofflampen eingesetzt. Daneben wird Neodym auch in Elektroden von Ni-Metallhydrid-Akkus eingesetzt. Siehe auch seltene Erden. In Verbindung von Neodym mit Eisen und Bor entstehen Permanent-Magnete, die in modernen Fahrzeugen, Speichermedien digitaler Daten und in Lautsprechern eingesetzt werden (www.lennotech.com).

Metall	Einsatzbereiche in den Branchen EuE und IuK
Nickel	Für die IuK-Industrie ist Nickel bei der Herstellung von Ni-Cd-Akkumulatoren weltweit von Bedeutung, die für Hochstrom-Anwendungen (Elektrogeräte) häufig besser geeignet sind als Ni-Metallhydrid-Akkus (Elko: Nickel-MH-Akkus). In elektronischen Bauteilen findet Nickel Verwendung in z.B. SMD-Kondensatoren (Behrendt et al. 1998).
Niob	In der IuK-Industrie wird Niob u.a. in miniaturisierten Hochleistungskondensatoren eingesetzt (Behrendt et al. 1998).
Osmium	Für medizinische Implantate und künstliche Herzklappen wird eine Legierung aus 90 % Platin und 10 % Osmium genutzt. Darüber hinaus wird Osmium in Herzschrittmachern eingesetzt.
Palladium	Das Metall Palladium wird in Silberlegierungen in der Zahntechnik verwendet. In elektronischen Bauteilen wird es in SMD-Kondensatoren eingesetzt (Behrendt et al. 1998). Zur mengenmäßigen Anwendung in Mobiltelefonen: siehe Platin. Brennstoffzellen könnten zu einem wichtigen Anwendungsfeld in der Zukunft werden.
Platin	In Mobiltelefonen finden sich nennenswerte Mengen von Platin. Eine Untersuchung über den Edelmetallgehalt von Handys zeigte, dass der Metallgehalt in modernen Handys bei ca. 25 % liegt (ohne Batterien und Ladegerät) (Sullivan 2006), dabei vor allem Kupfer, Eisen, Nickel, Silber und Zink sowie geringe Mengen an Aluminium, Gold, Blei, Mangan, Palladium, Platin und Zinn. Bezüglich der wertvollen Metalle wurden in einem Handy folgende Mengen festgestellt: 16 g Kupfer, 0,35 g Silber, 0,034 g Gold, 0,015 g Palladium und 0,00034 g Platin. Diese teilweise sehr geringen Mengen pro Handy summieren sich durch den boomenden Markt zu großen Mengen auf. Bei einem Bestand von ca. 630 Millionen Handys in 2005 beträgt der Anteil der wertvollen Metalle ca. 10.000 t Kupfer, 224 t Silber, 20,9 t Gold, 9,4 t Palladium und 0,22 t Platin. Der Gesamtwert dieser wertvollen Metalle liegt bei 400 Mio. US\$ (Annahme von mittleren Preisen über die Nutzungszeit). Platindünnschichten verbessern die Speicherkapazität von Festplatten (Eurometaux, o.J.).
Platingruppenmetalle (Platin, Palladium, Rhodium, Ruthenium, Osmium, Iridium)	Platingruppenmetalle finden sich in elektronischen Komponenten und Computerfestplatten, Videogeräten, Katalysatoren, Geräten zur Glasherstellung, in zahnärztlichen Legierungen, in der Medizin und für den Zahnersatz. Im elektronischen Sektor wird Palladium für Kondensatoren und Widerstandskörper und Platin für Computerfestplatten verwendet sowie für Elektroden, Brennstoffzellen und Thermolemente. Platinlegierungen, sowie Platin-Rhodium-Legierungen werden für elektrisch-resistente Heizelemente genutzt, wie sie in Geräten wie Feuerzeugen, hot wire ignition, Nylonscheren, Schweißungsgeräten, Gewinden für muffler furnaces sowie medizinischen Geräten verwendet werden. Weltweit wurden in 2002 22.100 kg (710.000 oz) Palladium, 11.800 kg (380.000 oz) Platin, 4.500 kg (145.000 oz) Ruthenium, 680 kg (22.000 oz) Iridium und 200 kg (6.000 oz) Rhodium für elektrische Geräte eingesetzt. Daneben wird es in den in Entwicklung befindlichen Miniatur-Brennstoffzellen für Handys, Laptops und anderen tragbaren elektronischen Geräte eingesetzt, sowie in Brennstoffzellen wasserstoffbetriebener Fahrzeuge. Für Zahnersatz wurden in 2002 23.000 kg (750.000 oz) eingekauft. Geringe Mengen Platin wurden außerdem für Medikamente gegen Krebs und medizinische Implantate genutzt. Die Nachfrage nach Metallen der Platingruppe im elektronischen Sektor nimmt durch einen steigenden Bedarf an höheren Speicherkapazitäten für Computer zu (USGS: PGM World Supply and Demand 2001-2007).
Praseodym	
Promethium	

Metall	Einsatzbereiche in den Branchen EuE und IuK
Quecksilber	Quecksilber wird vor allem als Amalgam (Legierung mit Silber) in der Zahntechnik verwendet. Zur Beleuchtung werden bei hohen Lichtstärken auch Quecksilberdampf-lampen verwendet (Rutherford: Quecksilber). Eine wichtige Anwendung waren Quecksilber-Knopfzellen mit Quecksilberoxid, die seit 2001 verboten sind, doch immer noch weltweit produziert werden. In Laptops wird die Hintergrundbeleuchtung der Displays durch Kaltkathodenröhren erreicht (Wikipedia 2006: Quecksilberdampflampe). Gemäß RoHS-Richtlinien dürfen einige Metalle, darunter Quecksilber, seit Juli 2006 nicht mehr eingesetzt werden. Eine Ausnahme hiervon sind Kompaktleuchtstofflampen, bei denen Quecksilber in einer Höchstmenge von 5 mg pro Lampe erlaubt ist. Einige Unternehmen haben auf die RoHS frühzeitig reagiert, z.B. kamen bereits früh quecksilberfreie Displays auf den Markt.
Rhenium	In Elektroprodukten findet Rhenium Anwendung für elektrische Kontakte, Elektromagnete und Elektronenröhren (USGS: Rhenium). Weitere Anwendungen sind Glühdrähte und Thermobauteile (Rutherford: Rhenium, USGS: Rhenium).
Rhodium	Rhodium wird in der Lasertechnik für Spiegel eingesetzt. In EuE-Produkten wird es nur in geringem Umfang eingesetzt.
Rubidium	Rubidium wird in Fotozellen verwendet (Rutherford: Rubidium). Weitere Anwendungen finden sich in der Laser- und Glasfasertechnologie. Daneben wird es in Nachtsichtgeräten eingesetzt (USGS: Rubidium).
Ruthenium	
Samarium	Samarium wird in Form intermetallischer Verbindungen mit Cobalt als Permanentmagnet genutzt, z.B. in allen kleinen Motoren.
Scandium	Scandium wird in Magnetspeichern verwendet. Ausserdem wird es Lasertechnologie verwendet (USGS: Scandium).
Selen	Selen wird in der Halbleitertechnik verwendet und in Solarzellen eingesetzt.
Seltene Erden	Seltene Erden werden in Elektroprodukten vor allem als Leuchtstoffe in Leuchtstofflampen eingesetzt. Die wichtigsten Leuchtstoffe sind vermutlich Cer, Erbium und Ytterbium (siehe auch Ruby, o.J.). Daneben findet es sich auch in Permanentmagneten. Zudem wird es eingesetzt in der Glasfasertechnologie und in Supraleitern. Lanthan und Neodym werden auch in Elektroden von Ni-Metallhydrid-Akkus eingesetzt. Überdies spielen Seltene Erden auch eine Rolle bei der Hochtemperatursupraleitung.
Silber	Silber wird in Batterien und EE-Bauelementen (SMD-Kondensatoren) eingesetzt. In PV-Zellen werden „Finger“ aus Silber zur Herstellung der Kontakte verwendet (Solarserver, o.J.). Silber wird in Fernsehgeräten als Leuchtstoffe verwendet. In elektronischen Bauteilen findet es Verwendung in SMD-Kondensatoren (Behrendt et al. 1998). Zur mengenmäßigen Anwendung in Mobiltelefonen: siehe Platin. Silber findet sich als Dünnschicht auf CDR (Eurometaux, o.J.).
Strontium	Strontium findet sich in großen Mengen in den Bildschirmgläsern von Bildröhren.
Tantal	Anwendungen von Tantal sind Implantate, da es nicht toxisch ist (Rutherford: Tantal).
Tellur	Anwendungen von Tellur in EE-Bauteilen sind Fotozellen und termoelektrischen Bauteile. Cadmium-Tellurid wird auch für Solarzellen in kleinerem Maßstab eingesetzt (Lauermann 1998). Gleichfalls wird Tellur in optischen Speichermedien (CD-RW) verwendet. Tellur kann auch in Peltier-Elementen zur Kühlung von IC verwendet werden.
Terbium	Terbium wird als Leuchtstoff in der Lasertechnologie eingesetzt, daneben auch in Form von Tb-Fe-Co-Legierungen in magneto-optischen 'Mini-Discs'. Bei wiederbeschreibbaren CD wird die Magnetisierung mittels Laser gelöscht, indem die Curie-Temperatur überschritten wird (siehe auch Ruby, o.J.). Vgl. seltene Erden

Metall	Einsatzbereiche in den Branchen EuE und IuK
Thallium	Anwendungen von Thallium sind Filter für kabellose Kommunikation, Strahlungsmesser und Spezialgläser für Infrarot und zur Lichtbrechung in der Akkusto-Optik. Weitere Anwendungen finden sich in Medizinprodukten (USGS: Thallium). Thallium wird auch für die Hochtemperatursupraleitung (Forschung) als wichtig erachtet.
Thulium	
Titan	Seit kurzem wird Titanoxid als Nanobeschichtung eingesetzt. In IuK-Produkten wird es vermutlich nur sehr selten eingesetzt. NTC-Heißleiter (temperaturabhängige Halbleiterwiderstände) können Zink-Titanate enthalten und PTC-Kaltleiter können Titan-Keramik enthalten (Elko: NTC-Heißleiter). Titanoxid findet sich als Zusatz in Bildröhrenglas.
Vanadium	
Wolfram	Wolfram wird für Glühdrähte in Lampen verwendet (Rutherford: Wolfram). Weitere Anwendungen sind Elektroden, Kabel und Elektrokomponenten (USGS: Tungsten). Wolframoxid findet sich als Zusatz in Bildröhrenglas.
Ytterbium	Ytterbium wird als Leuchtstoff in Fernsehgeräten eingesetzt (Behrendt et al. 1998). Siehe auch seltene Erden.
Yttrium	Yttrium vor allem in leuchtstarken Lampen und Kathodenstrahlröhren (Fernseher) eingesetzt. Darüber hinaus wird es in Dauermagneten genutzt. Andere Anwendungen von Yttrium sind Sauerstoffsensoren für Kfz, Signalkontrollen für Mikrowellenradar, Laser in der digitalen Kommunikation und nichtlinearen Optik. Eu-dotiertes Y_2O_3 wird in Energiesparlampen eingesetzt. Eu-dotiertes Y_2O_2S dient als roter Leuchtstoff in Monitoren und Fernsehern (Ruby, o.J.).
Zink	Zink-Kohle-Batterien sind wichtige Trockenbatterien. Darüber hinaus wird Zink in Elektroprodukten und EE-Bauteilen sehr häufig eingesetzt, wodurch es zu den mengenmäßig relevanten Metallen zu zählen ist. Zinkoxid findet sich als Zusatz in Bildröhrenglas und bei den Leuchtstoffen (Behrendt et al. 1998).
Zinn	Zinn wird vor allem als Lötzinn für EE-Produkte verwendet. Viele EE-Bauteile enthalten Zinn (z.B. Kondensatoren mit Zinnfolien).
Zirkon	Als Füllstoff ist Zirkon es in Blitzlichtern vorhanden (Rutherford: Zirkon). In Fernsehgeräten findet es sich als Oxid in Bildröhrenglas.

Tab. 10-5: Einsatz von Metallen im Anwendungsbereich Medizin

Metall	Medikamente (M)	Diagnostik (D) / Strahlentherapie (S)	Prothetik (P) und sonstiges (S)
Aluminium	<ul style="list-style-type: none"> Aluminium wird als Medikament gegen Sodbrennen eingesetzt. Viele der so genannten Antiazida enthalten eine Aluminiumverbindung als Hauptwirkstoff (vgl. http://www.ktipp.ch/themen/beitrag/1019766/Warnung_vor_Alu-Pillen). Aluminium–Kaliumsulfat (Alaun): Alaun hemmt Blutungen des Zahnfleisches und bei Rasierschnitten, es fördert die Wundheilung am Zahnfleisch, es wirkt gegen Entzündungen der Mundschleimhäute und kann entzündete Rachenschleimhäute lindern (vgl. http://medikamente.onmeda.de/Wirkstoffe/Aluminium-Kaliumsulfat.html). Aluminiumacetat $\text{Al}(\text{CH}_3\text{-COO})_3$ (essigsäure Tonerde) wird für entzündungshemmende Umschläge verwendet. 		

Metall	Medikamente (M)	Diagnostik (D) / Strahlentherapie (S)	Prothetik (P) und sonstiges (S)
Antimon	<ul style="list-style-type: none"> Antimon-V-Verbindungen finden Anwendung als Medikament bei einer Leishmaniose (Krankheitsbilder Kala-Azar, Orientbeule und amerikanische Haut- und Schleimhaut-Leishmaniose). Die fünfwertigen Verbindungen sind deutlich aktiver als die dreiwertigen Antimonverbindungen. Medikamente hierzu sind Natriumstibo[V]-gluconat (Pentostam®) und N-Methylglucaminantimonat[V] (Glucantime®) (vgl. http://www.pharmazeutische-zeitung.de/fileadmin/pza/2000-10/titel.htm) Antimon-III-Verbindungen: Als Tropfenmittel sind Antimon[III]-lithiumthiomalat (Anthiomaline®) und Natriumstibo[III]-captat gebräuchliche Verbindungen; letzteres ist ein Derivat der Dimercaptobernsteinsäure. 	<ul style="list-style-type: none"> Antimonsulfid-[99mTc]-Technetium-Lösung wird als kolloidale Lösung zur Röntgendarstellung von Leber, Milz und Knochenmark sowie zur Lymph-Scintigraphie verwendet (http://www.pharmazeutische-zeitung.de/fileadmin/pza/2000-10/titel.htm). 	
Arsen	<ul style="list-style-type: none"> Arsen besitzt nur eine untergeordnete therapeutische Bedeutung (http://www.pharmazeutische-zeitung.de/fileadmin/pza/2000-10/titel.htm). 		
Barium		<ul style="list-style-type: none"> Bariumsulfat wird positives Kontrastmittel beim Röntgen verwendet. Als Kontrastmittel in der Projektionsradiografie eignen sich unlösliche Bariumsalze als Aufschwemmung. Barium wird gewöhnlich für den Verdauungstrakt verwendet (http://www.radiodiagnostik-akhwien.at/index.aspx?PID=98). 	<ul style="list-style-type: none"> Bariumsulfat wird in medizinischen Kunststoffen eingesetzt. Unklar ist, ob es sich um einen bloßen Füllstoff für die Kunststoffe handelt.
Blei	Bleivergiftungen		<ul style="list-style-type: none"> Blei ist ein wichtiges Metall zur Abschirmung von Röntgenstrahlen.

Metall	Medikamente (M)	Diagnostik (D) / Strahlentherapie (S)	Prothetik (P) und sonstiges (S)
Cadmium			<ul style="list-style-type: none"> Cadmiumsulfid und -selenid sind Farbstoffe, die in Kunststoffzahnprothesen verwendet, doch zunehmend durch synthetische Phenolderivate verdrängt werden. Es gibt bisher keine Hinweise, dass die Verwendung Nebenwirkungen hat (z.B. Kontaktstomatitiden durch die Cadmiumverbindungen (vgl. http://www.zahn-studio.at/04_produkte/con_005.html)).
Cäsium		<ul style="list-style-type: none"> Cäsium-137 wird in der Strahlentherapie als radioaktiver Strahler verwendet (Teletherapie und Brachytherapie (vgl. www.hmulv.hessen.de/irj/HMULV_Internet?cid=1b72ab7a9fae17490fb40b77fa0a9ed3)). 	
Calcium	<ul style="list-style-type: none"> Calciumcarbonat wird in Kombination mit Colecalciferol (Vitamin D) bei Calciummangel bzw. durch Calciummangel verursachte Beschwerden verabreicht, um den den Knochen- und Zahnaufbau zu fördern (vgl. www.livingzen.de/showroom/calcium/calciumshowroom.htm). Calciumabkömmlinge z.B. Calipotriol, Calitriol sind neuere lokale Wirkstoffe in der Psoriasisstherapie (lokal, Präparate: Psorcutan, Daivonex). 		

Metall	Medikamente (M)	Diagnostik (D) / Strahlentherapie (S)	Prothetik (P) und sonstiges (S)
Chrom			<ul style="list-style-type: none"> Chrom wird in Form von Chrom-Cobalt-Molybdän-Legierungen in der Zahnprothetik verwendet (Teleskopkronen). Die Legierungen sollten mindestens 25 Gewichtsprozent Cr und 4 Gewichtsprozent Mo enthalten. Cobalt-Chrom-Legierungen sind heute Standard beim Modelguss (vgl. http://www.zahnwissen.de/frameset_lexi.htm)
Cobalt		<ul style="list-style-type: none"> Cobalt-60 wird in der Strahlentherapie als radioaktiver Strahler verwendet (Teletherapie und Brachytherapie) (vgl. www.hmulv.hessen.de/irj/HMULV_Internet?cid=1b72ab7a9fae17490fb40b77fa0a9ed3). 	<ul style="list-style-type: none"> Cobalt wird in Form von Chrom-Cobalt-Molybdän-Legierungen in der Zahnprothetik verwendet (Teleskopkronen). Cobalt-Chrom-Legierungen sind heute Standard beim Modelguss (vgl. http://www.zahnwissen.de/frameset_lexi.htm)
Dysprosium			
Eisen	<ul style="list-style-type: none"> Eisenhaltige Präparate wie Eisenfumarat werden als Antianämika (Eisenmangel) verabreicht, um die Erythrozytenbildung zu fördern. 	<ul style="list-style-type: none"> Eisenoxidnanopartikel werden zur Darstellung des retikulo-endothelialen Systems etwa in der Diagnostik von Leberkrankheiten (Tumore, Metastasen, Zysten, Hämangiome) genutzt. 	<ul style="list-style-type: none"> Eisen wird in der Kieferorthopädie in Form von FeCrNi-Legierungen und bei herausnehmbaren Provisorien als Klammerdrähte genutzt (vgl. www.zahnwissen.de/frameset_lexi.htm).
Erbium		<ul style="list-style-type: none"> Erbium-169 wird bei der Behandlung entzündlicher Gelenkerkrankungen (Radiosynoviothese) eingesetzt (vgl. www.bfs.de/de/bfs/presse/pr02/pr0228.html). 	
Gadolinium		<ul style="list-style-type: none"> Gadoliniumverbindungen (Chelate) werden in Magnetresonanztomographie als Kontrastmittel in der medizinischen Diagnostik (z.B. zur Früherkennung von Brustkrebs und Niereninsuffizienz) verwendet. 	

Metall	Medikamente (M)	Diagnostik (D) / Strahlentherapie (S)	Prothetik (P) und sonstiges (S)
Gallium		<ul style="list-style-type: none"> Gallium-67-citrat wird in der Szintigraphie zur Identifikation von Tumoren eingesetzt. Gallium-68 wird in der PET-Diagnostik zur Tumorerkennung eingesetzt (vgl. http://www.dkfz.de/de/radiochemie/Projekte/ProjektE0302.html). 	
Germanium	<ul style="list-style-type: none"> Carboxyethylgermanium-Sesquioxid ($\text{GeCH}_2\text{CH}_2\text{COOH}$)₂O₃ wird von der alternativen Medizin zur verbesserten Sauerstoffversorgung und zur Entgiftung empfohlen. In Deutschland sind die Präparate verboten, da es keinen klinisch Nachweis zur Wirksamkeit gibt (vgl. http://www.zentrum-der-gesundheit.de/organisches-germanium-ia.html und http://www.nlnv.de/front_content.php?client=1&lang=1&idcat=47&idart=236&m=&s=). 		
Gold	<ul style="list-style-type: none"> Goldpräparate wie z.B. Tauredon wurden lange Zeit bei Rheuma-Erkrankungen verabreicht. Es war sehr wirksam, hatte aber schwere Nebenwirkungen. Inzwischen wird es nur noch bei Patienten verwendet, die wirksamere Präparate wie Methotrexat nicht vertragen (vgl. www.rbb-online.de/fernsehen/magazine/beitrag.jsp?key=rbb_beitrag_4265662.html). 		<ul style="list-style-type: none"> Gold wird vor allem für Zahnersatz verwendet (Brücken, Kronen) (vgl. http://www.zahnwissen.de/frameset_lexi.htm) Gegenüber Zahngold gibt es vereinzelt Kontaktallergien (Natriumthiosulfataurat).

Metall	Medikamente (M)	Diagnostik (D) / Strahlentherapie (S)	Prothetik (P) und sonstiges (S)
Indium		<ul style="list-style-type: none"> Indium-111 wird in Verbindung mit Yttrium-90 bei non-Hodgin's Lymphome zur Strahlendiagnostik verwendet (vgl. http://www.zevalin.ch/pages/index.cfm?dom=1003&prub=1255&p=1). 	
Iridium	<ul style="list-style-type: none"> Iridium- und Rhodiumverbindungen sind als Zytotoxika für die Krebsbehandlung patentiert. Die Rhodium-Komplexe zeigten bei den untersuchten Zelllinien (Brust- und Darmkrebs) bis zu hundertfach höhere Zytotoxizität als Cisplatin (vgl. www.rubitec-patente.de/patente/medizin-medizintechnik.html). 		
Kalium (Kalisalze)	<ul style="list-style-type: none"> Kaliumpräparate werden bei kaliummangelbedingten Krankheiten wie Herzrhythmusstörungen, Bluthochdruck, Verstopfungen, Ödemen, Muskelschwäche, Krämpfen, Ermüdungs- und Erschöpfungszuständen verordnet (vgl. www.qualimed.de/kalium.html). 		
Kupfer	<ul style="list-style-type: none"> Kupfersulfat dient als wirksames Brechmittel (http://www.novamex.de/nmb/vitaminspur/Spurenelemente/spurkupf.html). 		
Lanthan			<ul style="list-style-type: none"> Lanthan wird in einer Legierung mit Titan für Operationsbestecke verwendet, da es korrosionsvermeidend und gut sterilisierbar ist.
Lithium	<ul style="list-style-type: none"> Lithiumsalze wirken hervorragend bei Depressionen. Sie werden in großem Umfang eingesetzt. 		<ul style="list-style-type: none"> Lithiumbatterien werden in der Medizintechnik in Herzschrittmachern eingesetzt. Die Feststoffbatterien halten bis zu zehn Jahre.

Metall	Medikamente (M)	Diagnostik (D) / Strahlentherapie (S)	Prothetik (P) und sonstiges (S)
Magnesium	<ul style="list-style-type: none"> Magnesium wird bei Krämpfen der Wadenmuskulatur bei Kopfschmerzen, Verstopfung, Fettsucht, Leber- und Gallenleiden sowie Blutstauungen als Medikament und als Nahrungsergänzungsmittel angewendet (vgl. www.mineralienatlas.de/lexikon/index.php/Magnesium). 		
Mangan		<ul style="list-style-type: none"> Manganverbindungen (Mangan-DPDP) werden zur Identifizierung von Tumoren und Metastasen als Kontrastmittel für die Leber und die Bauchspeicheldrüse eingesetzt (vgl. http://www.thieme-connect.com/ejournals/abstract/rad-u2d/doi/10.1055/s-2006-925412;jsessionid=5A50F1C808E1FFE0F1FB880571E49277.jvm3). 	
Molybdän		<ul style="list-style-type: none"> Mo99-Tc99m wird häufig in der diagnostischen Nuklearmedizin verwendet. 	<ul style="list-style-type: none"> Molybdän wird in Form von Chrom-Cobalt-Molybdän-Legierungen in der Zahnprothetik verwendet (Teleskopkronen). Die Legierungen sollten mindestens 25 Gewichtsprozent Cr und 4 Gewichtsprozent Mo enthalten (vgl. http://www.zahnwissen.de/frameset_lexi.htm)
Natrium	<ul style="list-style-type: none"> Natriumsalze werden vor allem als Infusionslösungen verwendet. 		
Nickel			<ul style="list-style-type: none"> Nickel-Titan-Legierungen (NiTi) finden bei kieferorthopädischen Drähten ("Nitinol-Draht") und Wurzelkanalinstrumenten Verwendung (vgl. http://www.zahnwissen.de/frameset_lexi.htm)

Metall	Medikamente (M)	Diagnostik (D) / Strahlentherapie (S)	Prothetik (P) und sonstiges (S)
Niob			<ul style="list-style-type: none"> Niob findet sich als Legierungsmetall in der Zahnprothetik (vgl. www.zahnwissen.de/frameset_lexi.htm)
Osmium			<ul style="list-style-type: none"> Osmium wird in einer Legierung mit Platin (10 % Osmium, 90 % Platin) für Herzklappen verwendet. Auch in Herzschrittmachern ist diese Legierung enthalten (vgl. http://www.goldseiten.de/content/wissen/info-osmium.php)
Palladium			<ul style="list-style-type: none"> Als provisorischer, festsitzender Zahnersatz ("Langzeitprovisorium") werden Silberlegierungen eingesetzt, die als Legierungsmetall häufig Palladium führen (AgPd). Aufgrund des hohen Weltmarktpreises ist der Palladiumeinsatz aber nicht mehr wirtschaftlich (vgl. www.zahnwissen.de/frameset_lexi.htm) Palladium wird in Legierungen für künstliche Gelenke eingesetzt
Platin	<ul style="list-style-type: none"> Platin wird vor allem in Form von Cis-Platin als eines der wichtigsten zellteilungshemmenden Medikamente (Zytostatika) zur Behandlung von Krebserkrankungen eingesetzt, obwohl es erhebliche Nebenwirkungen hat (vgl. www.uni-heidelberg.de/presse/ruca/ruca04-02/hucke.html). Cis-Platin wird auch beim malignen Melanom in der Chemotherapie verwendet 		<ul style="list-style-type: none"> Platin wird in einer Legierung mit Osmium (10 % Osmium, 90 % Platin) für Herzklappen verwendet. Auch in Herzschrittmachern soll diese Legierung enthalten sein (vgl. http://www.goldseiten.de/content/wissen/info-osmium.php)
Promethium		<ul style="list-style-type: none"> Einsatz von Promethium in der medizinischen Diagnostik, jedoch unsicher 	<ul style="list-style-type: none"> Promethium wurde früher als Energiequelle für Herzschrittmacher verwendet (vgl. www.bfs.de/de/bfs/druck/uus/JB05_BIV.pdf)

Metall	Medikamente (M)	Diagnostik (D) / Strahlentherapie (S)	Prothetik (P) und sonstiges (S)
Quecksilber	<ul style="list-style-type: none"> Quecksilberverbindungen werden als Haut- und Schleimhautdesinfizienten eingesetzt (vgl. www.pharmazeutische-zeitung.de/fileadmin/pza/2000-10/titel.htm) 	<ul style="list-style-type: none"> Einsatz in Thermometern als Ausdehnungsflüssigkeit 	<ul style="list-style-type: none"> Silberamalgam ist eine Legierung aus Quecksilber, Silber und Zinn, welche für Zahnfüllungen verwendet wird. In 2000 wurden in Deutschland schätzungsweise 20 t Amalgam verarbeitet (vgl. www.zahnwissen.de/frameset_lexi.htm)
Rhenium		<ul style="list-style-type: none"> Rhenium-186-HEDP wird als Radiopharmaka zur Schmerztherapie bei Skelettmetastasen zur Behandlung entzündlicher Gelenkerkrankungen (Radiosynoviothese) eingesetzt (vgl. www.hmulv.hessen.de/irj/HMULV_Internet?cid=1b72ab7a9fae17490fb40b77fa0a9ed3) Rhenium-188 wird bei der Verengungen von Blutgefäßen (endovaskulären Brachytherapie) eingesetzt (vgl. www.bfs.de/de/bfs/presse/pr02/pr0228.html) 	
Rhodium	<ul style="list-style-type: none"> Rhodium und Iridiumverbindungen sind als Zytotoxika für die Krebsbehandlung patentiert. Diese Rhodium-Komplexe zeigten bei den untersuchten Zelllinien (Brust- und Darmkrebs) bis zu 100fach höhere Zytotoxizität als Cis-Platin (vgl. www.rubitec-patente.de/patente/medizin-medizintechnik.html) 	<ul style="list-style-type: none"> Rhodium-106 wird zur Therapie von Augentumoren verwendet (vgl. www.bfs.de/de/bfs/presse/pr02/pr0228.html) 	
Ruthenium		<ul style="list-style-type: none"> Ruthenium-106 wird zur Therapie von Augentumoren verwendet (vgl. www.bfs.de/de/bfs/presse/pr02/pr0228.html) 	

Metall	Medikamente (M)	Diagnostik (D) / Strahlentherapie (S)	Prothetik (P) und sonstiges (S)
Samarium		<ul style="list-style-type: none"> Samarium-153 wird als Radiopharmaka zur Schmerztherapie bei Skelettmetastasen verwendet (vgl. www.hmulv.hessen.de/irj/HMULV_Internet?cid=1b72ab7a9fae17490fb40b77fa0a9ed3) 	
Selen	<ul style="list-style-type: none"> Selen findet sich in einer Reihe von Medikamenten gegen Hauterkrankungen. Es wird als therapieunterstützendes Medikament bei der Behandlung der Kleienpilz- und Schuppenflechte angewandt (vgl. www.onmeda.de/lexika/naehrstoffe/spurenelemente/selen.html) Selen oder Selenverbindungen sollen Nebenwirkungen von Chemo- und Strahlentherapien mindern (vgl. www.medizin-2000.de/news/2002/selenmangel.html) Selen wird auch in Nahrungsergänzungsmitteln (Vitamintabletten) verwendet, da es Herz- und Kreislaufleiden entgegenwirkt 		<ul style="list-style-type: none"> Selen findet in Antischuppen-Shampoos Verwendung

Metall	Medikamente (M)	Diagnostik (D) / Strahlentherapie (S)	Prothetik (P) und sonstiges (S)
Silber	<ul style="list-style-type: none"> Silberverbindungen werden als Haut- und Schleimhautdesinfizienten eingesetzt (http://www.pharmazeutische-zeitung.de/fileadmin/pza/2000-10/titel.htm) 	<ul style="list-style-type: none"> Silberbromid ist der licht- u. röntgen-empfindliche Bestandteil von Röntgenfilmen 	<ul style="list-style-type: none"> Silberamalgam ist eine Legierung von Quecksilber, Silber und Zinn, welches für Zahnfüllungen verwendet wird. In 2000 wurden schätzungsweise 20 t Amalgam in Deutschland verarbeitet (vgl. www.zahnwissen.de/frameset_lexi.htm) Silberlegierungen, meist in Legierung mit Palladium (AgPd), wurden als provisorischer, festsitzender Zahnersatz ("Langzeitprovisorium") verwendet. Aufgrund des hohen Weltmarktpreises ist der Palladiumeinsatz aktuell nicht wirtschaftlich (vgl. www.zahnwissen.de/frameset_lexi.htm) Silber in nanoskaliger Form wird zunehmend für Wundverbände und Pflaster eingesetzt, da es keimtötend ist (vgl. http://wound.smith-nephew.com/at/node.asp?Nodeid=3242) Silber in nanoskaliger Form wird möglicherweise auch für Keramiken und Beschichtungen in Krankenhäusern verwendet werden können, da es in dieser Form keimtötend ist Silberbeschichtete Kleidung wird auch für Neurodermitiker verwendet Silber als Metallfolie wird bei Verbrennungen eingesetzt

Metall	Medikamente (M)	Diagnostik (D) / Strahlentherapie (S)	Prothetik (P) und sonstiges (S)
Strontium		<ul style="list-style-type: none"> Strontium-90 wird in der Strahlentherapie als radioaktiver Strahler verwendet, unter anderem bei Verengungen von Blutgefäßen (Teletherapie und Brachytherapie). Strontium-89-Chlorid wird als Radiopharmaka zur Schmerztherapie bei Skelettmastasen eingesetzt (vgl. www.hmuv.hessen.de/irj/HMULV_Internet?cid=1b72ab7a9fae17490fb40b77fa0a9ed3, www.bfs.de/de/bfs/presse/pr02/pr0228.html) Früher wurden Kontaktstrahler mit radioaktivem Strontium-Yttrium zur Strahlentherapie von Angiomen verwendet. Hierbei traten jedoch starke Nebenwirkungen auf, vor allem bei Kindern in den Gelenkfugen 	
Tantal			<ul style="list-style-type: none"> Tantal wird in größerem Umfang für Implantate (Knochennägel, Gelenkimplantaten, Klammern, Schrauben, ggf. Stents) eingesetzt (vgl. http://www.bvmed.de/innovationspool/Produktarten/Implantate/innovation/Hueftpfannenkomponente_aus_Material_mit_knochenaehnlicher_Struktur.html, http://www.rohstoffwelt.de/news/artikel.php?sid=4004)

Metall	Medikamente (M)	Diagnostik (D) / Strahlentherapie (S)	Prothetik (P) und sonstiges (S)
Technetium		<ul style="list-style-type: none"> Antimonsulfid-[99mTc]-Technetium-Lösung wird in der Nuklearmedizin als kolloidale Lösung zur Darstellung von Leber, Milz und Knochenmark sowie zur Lymph-Szintigraphie verwendet. Es ist das am häufigsten verwendete Radionuklid in der Nuklearmedizin (vgl. www.hmulv.hessen.de/irj/HMULV_Internet?cid=1b72ab7a9fae17490fb40b77fa0a9ed3 und www.pharmazeutische-zeitung.de/fileadmin/pza/2000-10/titel.htm) 	
Thallium		<ul style="list-style-type: none"> Thallium-201 wird in der Herz- und Tumordiagnostik verwendet 	

Metall	Medikamente (M)	Diagnostik (D) / Strahlentherapie (S)	Prothetik (P) und sonstiges (S)
Titan			<ul style="list-style-type: none"> • Titan wird in großem Umfang für Implantate verwendet, da es keine immunologischen Reaktionen hervorruft. In der chirurgischen Orthopädie wird es in Hüftendoprothesen, Hüftköpfe und Kniegelenke eingesetzt. In der Mittelohrchirurgie wird es als Material für Gehörknöchelchenerersatz-Prothesen und für Paukenröhrchen verwendet • Titan wird in einer Legierung mit Lanthan für Operationsbestecke verwendet, da es korrosionsvermeidend und gut sterilisierbar ist • Nickel-Titan-Legierungen (NiTi) finden bei kieferorthopädischen Drähten ("Nitinol-Draht") und Wurzelkanalinstrumenten Verwendung (vgl. http://www.zahnwissen.de/frameset_lexi.htm). • Titan wird für Zahnimplantate und Implantathilfsteile, Wurzelstifte und festsitzenden Zahnersatz verwendet (Kronen, Brücken, vgl. www.zahnwissen.de/frameset_lexi.htm) • Titan wird als Substitut bei Allergiereaktionen auf Legierungsmetalle in Brillengestellen. Titan bewirkt keine Kontaktallergien

Metall	Medikamente (M)	Diagnostik (D) / Strahlentherapie (S)	Prothetik (P) und sonstiges (S)
Yttrium		<ul style="list-style-type: none"> Yttrium-90 wird bei Radiotherapien und Radioimmuntherapien maligner Tumore eingesetzt (z.B. bei Leber- und Darmkrebs) Die Radiosynoviorthese (RSO) mit dem β-strahlenden Nuklid Yttrium-90 ist ein etabliertes Verfahren zur lokalen Therapie entzündlich-rheumatischer Erkrankungen der Gelenke Yttrium-90 wird in Verbindung mit Indium-111 bei non-Hodgin's Lymphome zur Strahlendiagnostik verwendet (vgl. http://www.zevalin.ch/pages/index.cfm?dom=1003&prub=1255&p=1) Yttrium-90 wird bei der Behandlung von Verengungen von Blutgefäßen (endovaskuläre Brachytherapie) eingesetzt (vgl. www.bfs.de/de/bfs/presse/pr02/pr0228.html) 	
Zink	<ul style="list-style-type: none"> Zink wird vielfach als Nahrungsergänzungsmittel verwendet, da es für zahlreiche biochemische Prozesse relevant ist Zink ist ein wichtiges Mittel zur Behandlung von Hauterkrankungen (vgl. www.om-praxis.net/orthomolekular/b-erstinforseitschek.html) 		<ul style="list-style-type: none"> Zink wird in Sonnenschutzcremes eingesetzt In der Orthopädie werden Zinkleinverbände verwendet Zinkperoxid wird als Desinfektionsmittel verwendet
Zinn			<ul style="list-style-type: none"> Silberamalgam ist eine Legierung von Quecksilber, Silber und Zinn, welches für Zahnfüllungen verwendet wird. In 2000 wurden schätzungsweise 20 t Amalgam in Deutschland verarbeitet (vgl. www.zahnwissen.de/frameset_lexi.htm)

Metall	Medikamente (M)	Diagnostik (D) / Strahlentherapie (S)	Prothetik (P) und sonstiges (S)
Zirkon			<ul style="list-style-type: none"> • Zirkonoxid wird für Gehör-, Finger- und Hüftendoprothesen sowie Hüftgelenkprothesen verwendet. • Zirkonoxid wird in der Dentaltechnik für Stifte, Implantate und Kronen- und Brückenversorgungen eingesetzt (vgl. http://www.schoenheit-und-medizin.de/zaehne/zahnersatz/implantate-zirkonoxid.html)

10.4 Anhang 4 – Thematische Überblicke über dissipative Verwendung und feinverteilten Einsatz von Metallen

Im Rahmen des Screenings (vgl. Kap. 2.2.6) wurden dissipative Verwendungen und feinverteilte Einsätze entlang verschiedener Produktgruppen bestimmt und in den folgenden Tabellen zusammengestellt. In zahlreichen Fällen liegen keine Daten vor. Es ist zudem davon auszugehen, dass diese Zusammenstellung nicht vollständig ist und weiterführende Untersuchungen auch weitere dissipative Verwendungen etc. offenlegen würden.

Stähle, Carbide und Oberflächenbeschichtungen

Die Stahlindustrie setzt zahlreiche Metalle zur Herstellung von Spezialstählen ein. Die wichtigsten Legierungsmetalle sind Chrom, Cobalt, Mangan, Molybdän, Nickel, Niob, Vanadium, Bismut und Wolfram (Carbide). Rhenium wird in geringerem Umfang zur Herstellung von Spezialstählen eingesetzt. Magnesium wird zur Entschwefelung in größerem Umfang eingesetzt.

Tab. 10-6: Einsatz von Metallen als Zusatzstoffe bei der Herstellung von Stahllegierungen⁵⁵ (2007), bezogen auf den gesamten Einsatz des Metalls in den Vereinigten Staaten bzw. weltweit. Die erläuternden Begriffe, die hinter den Prozentzahlen angeführt sind, beschreiben den Einsatz so genau als möglich und sind daher nicht systematisch begründet

Metall	Einsatz weltweit	Einsatz in den USA
Chrom	93% Stahlherstellung (Angerer et al. 2008)	
Cobalt	30 % Stahlherstellung; 11 % Hartmetalle (Schneidwerkzeuge) (Angerer et al. 2008)	45 % Stahlherstellung (Flugzeuggas- turbinen); 14 % Metallprodukte, 9 % Carbide (Schneidwerkzeuge)
Magnesium		10 % Stahlherstellung
Mangan		44 % Stahlherstellung
Molybdän		81 % Stahlherstellung
Nickel		86 % Stahlherstellung; 10 % Vernickelung
Niob		100 % Stahlherstellung

⁵⁵ In der Metallurgie werden Legierungen als Gemenge mit metallischem Charakter bezeichnet, die aus zwei oder mehr Elementen bestehen, von denen mindestens eines Metall ist. Stähle sind deshalb Legierungen genauso wie Bronzen (Kupferlegierungen) oder Carbide (Gemenge von Kohlenstoff und Metall). Vielfach werden einzelne Legierungsbestandteile auch als Additive bezeichnet wenn sie in geringen Mengen beigesetzt werden um spezifische Eigenschaften der Legierung zu erreichen.

Metall	Einsatz weltweit	Einsatz in den USA
Rhenium		60 % Stahlherstellung (Turbinenstähle)
Vanadium		91 % Stahlherstellung
Bismut		47 % Stahladditive
Wolfram		50 % Carbide; 50 % Sonstiges

Quelle: USGS (2008)

Darüber hinaus werden verschiedene Metalle in Form von Legierungen, Beschichtungen, Gussstücken oder Produktionshilfsmitteln in der Metallindustrie eingesetzt (Tab. 10-7).

Tab. 10-7: Einsatz von Metallen zur Herstellung von Legierungen (inkl. Stahllegierungen) und zur Oberflächenbeschichtung, bezogen auf den gesamten Einsatz des Metalls in den Vereinigten Staaten bzw. weltweit. Daten für 2007 sofern nicht anders angegeben

Metall	Einsatz weltweit	Einsatz in den USA
Cadmium		7 % Beschichtungen
Magnesium		43 % Al-Mg-Legierungen (Verpackungen, Kraftfahrzeuge u.a.); 37 % Gussstücke;
Seltene Erden		20 % Legierungen (2006)
Strontium		10 % Legierungen; 6 % Zinkherstellung
Titan		76 % Luft- und Raumfahrt; 24 % Sonstiges
Zink		55 % Galvanisierung, 21 % Legierungen, 16 % Messing und Bronzen
Zinn	18 % Weißblech; 6 % Legierungen (Angerer et al. 2008)	26 % Dosen und Verpackungen, 10 % Konstruktion; 10 % Verkehrswesen

Quelle: USGS (2008)

Katalysatoren

Zahlreiche Metalle werden als Katalysatoren eingesetzt. Hierbei sind jedoch zwei unterschiedliche Nutzungen zu unterscheiden. Zum einen gibt es Katalysatoren, die in großtechnischen Produktionsanlagen (Erdölindustrie, chemische Industrie, Rauchgasreinigung) genutzt werden. Diese werden aufgrund des Metallgehalts und des Wertes des Katalysators üblicherweise einem Recycling zurückgeführt. Zum anderen gibt es

Massenprodukte wie z.B. Automobilkatalysatoren, in denen zwar nur geringe Mengen der Metalle eingesetzt werden, die aber in sehr großen Stückzahlen hergestellt werden. In der folgenden Tabelle sind die verschiedenen identifizierten Metalle aufgeführt (Tab. 10-8).

Tab. 10-8: Einsatz von Metallen in Katalysatoren, bezogen auf den gesamten Einsatz des Metalls in den Vereinigten Staaten bzw. weltweit. Bezugsdatum 2007 sofern nicht anders angegeben.

Metall	Einsatz weltweit	Einsatz in den USA
Cäsium	Hydrierungskatalysatoren	
Cer	Einsatz in Autokatalysatoren	
Cobalt	11 % Katalysatoren	
Germanium	15 % Polymerkatalysatoren	
Iridium	Katalysatoren (unter anderem Chlor-Alkalielektrolyse)	
Lanthan	Stabilisierung von Zeolithkatalysatoren der Erdölindustrie	
Palladium	Hydrierungskatalysatoren (Fetthärtung)	
Platin	88 t Schmuck; 78 t Kfz-Katalysatoren (2002) (Wilburn o.J.: S.67)	
Rhenium		20 % Katalysatoren der Erdölindustrie
Rhodium	85 % für Autokatalysatoren (Lenntech o.J.)	
Ruthenium	Katalysator zur Entfernung von H ₂ S in Erdöl, zur Herstellung von Ammoniak oder Essigsäure	
Samarium	Katalysator zur Ethanolumwandlung	
Seltene Erden		25 % Kfz-Abgaskatalysatoren; 22 % Erdölindustrie / Katalysatoren (2006)
Silber	5 % Katalysatoren (2007) (Fortis 2008)	
Tellur	Katalysatoren für die Gummiindustrie	
Vanadium		9 % Sonstiges (Katalysatoren für Schwefel- und Maleinsäure)

Quelle: USGS (2008)

Metallverbrauch durch Nutzung

Einige Metalle werden unter anderem durch die Nutzung von Produkten verbraucht⁵⁶, teils mit direktem Eintrag in die Biosphäre. Hierbei handelt es sich – in Form von Salzen – um Natrium, das in Waschmitteln eingesetzt wird, um Kalium, das in der Landwirtschaft in großem Umfang eingesetzt wird⁵⁷, sowie um Strontium für die Pyrotechnik. Auch Kupfersulfat oder Silbernitrat (Wasserdesinfektion) werden direkt in die Biosphäre eingebracht, doch diese Nutzungen haben eine sehr untergeordnete Bedeutung im Verhältnis zur gesamten Produktionsmenge des jeweiligen Metalls. Ein Sonderfall ist auch der Einsatz von Aluminium als Verpackungsmaterial (Aluminiumfolie). Ca. 22 % der Verwendung von Aluminium in den Vereinigten Staaten wird als Verpackungsmaterial genutzt. Einige quantifizierbare Nutzungen sind in der folgenden Tabelle aufgeführt (Tab. 10-9).

Tab. 10-9: Einsatz ausgewählter Metalle mit dissipativer Nutzung und Verbrauch, bezogen auf den gesamten Einsatz des Metalls in den Vereinigten Staaten. Datenbasis für die Vereinigten Staaten, bezogen auf das Jahr 2007

Metall	Einsatz in den USA
Aluminium	22 % für Verpackungsmaterial
Kalium	85 % Düngemittel (Kaliumcarbonat)
Natrium	Natriumsulfat : 46 % Seifen und Detergentia; 13 % Papierherstellung; 13 % Textilherstellung; 12 % Gläser; 7 % Teppich-Reiniger, 11 % sonstiges (USGS 2008) Natriumcarbonat : 50 % Glasherstellung; 29 % Chemikalien; 9 % Seifen und Detergentia; 4 % Nahrung; 3 % sonstiges; 2 % Papierherstellung; 1 % Wasserbehandlung
Strontium	43 % Pyrotechnik (Strontiumsalze)

Quelle: USGS (2008)

EuE-Produkte

Neben dem Bau- und Verkehrswesen sowie dem Maschinenbau werden in Elektro- und Elektronikprodukten der größte Teil der Metalle eingesetzt. In den vergangenen Jahren stiegen die Anforderungen in Bezug auf Funktionen und Miniaturisierung zunehmend, und gleichzeitig wurden immer mehr Metalle in die Produktion einbezogen. Heute finden sich nahezu alle Metalle in den EuE-Produkten (vgl. Kap. 3.1). Wegen der Vielfalt der EuE-Produkte, der auf globaler Ebene unzureichenden Rezyklierung dieser Produkte sowie der geringen Mengen, in denen die Metalle in den EuE-Produkten vorkommen, handelt es sich hierbei um eine dissipative Nutzung. Es zeigen

⁵⁶ Diese Einsatzweise beschreibt die dissipative Produktnutzung im engeren Sinne (s. Kap. 2.2.6).

⁵⁷ Weitere in der Landwirtschaft eingesetzte Metalle sind Kupfer und Zink.

sich jedoch auch deutliche Schwerpunkte beim Einsatz der Metalle in diesem Bereich. In der folgenden Tabelle sind relevante Nutzungen aufgeführt. Hierbei wurden jedoch nur Metalle aufgenommen, zu denen auch Daten zum sektorenbezogenen Einsatz vorlagen. Es ist davon auszugehen, dass weitaus mehr Metalle hier hinzuzurechnen sind. Eine vertiefte Untersuchung des Bereichs EuE wurde in einem späteren Schritt durchgeführt, deren Ergebnisse in Kap. 3.1 zusammengefasst sind.

Tab. 10-10: Dissipative Nutzung von Metallen in EuE-Produkten, bezogen auf den gesamten Einsatz des Metalls in den Vereinigten Staaten bzw. weltweit. Bezugsjahr 2007 soweit nicht anders angegeben.

Metall	Einsatz in den USA	Einsatz weltweit
Antimon	40 % feuerhemmende Mittel	75 % Flammenschutzmittel (Angerer et al. 2008)
Beryllium	50 % für IuK-Produkte; 50 % für Luftfahrt, Militär, Automobilelektronik und anderes	
Bismut	34 % schmelzbare Legierungen	
Cadmium	83 % für Batterien; 7 % Kunststoffstabilisierer	
Cobalt		22 % Batterien; 7 % Magnete (Angerer et al. 2008)
Gallium	66 % für IC; 20 % Optoelektronik (unter anderem LED, PV, Laser-Dioden)	
Germanium	50 % Infrarotanwendungen; 30 % Glasfaseranwendungen; 15 % Elektronik und PV	35 % Glasfaseranwendungen; 30 % Infrarotanwendungen; 15 % Elektronik und PV (USGS 2008).
Gold	6 % Elektroindustrie	
Indium	70 % Beschichtungen (zumeist LCD); 12 % EuE-Bauteile (inkl. PV); 12 % Lötmittel und Legierungen	84 % ITO-Beschichtungen (zumeist LCD); 2 % Halbleiter und elektronische Komponenten; (Angerer et al. 2008)
Kupfer	19 % Elektrik (sowohl Kupfer als auch Legierungen)	EuE USA 25 %, EuE Europa 38 %, EuE Asien 50 %; (Angerer et al. 2008)
Platin		11,8 t EuE (2002) (Wilburn o.J., 67)
Selen		12 % Elektronik und Kopiertechnik (2003) (Matons / George 2005)
Seltene Erden	10 % Leuchtstoffe; 10 % Magnete; 3 % Medizin und Laser (2006)	
Silber		22 % Elektrik und Elektronik (2007) (Fortis 2008)
Strontium	26 % Eisenoxid-Keramik-Magnete	
Tantal		50-60 % EuE bzw. Kondensatoren (TIC o.J., USGS 2008)
Yttrium	84 % Lampen und Kathodenstrahlröhren (Bildröhren); 7 % Elektronik	
Zinn	24 % Elektrik	50 % Lote (Angerer et al. 2008)

Quelle: USGS (2008)

Pigmente, Füllstoffe, Kunststoffstabilisierer und chemische Industrie

Einige Metalle wie Antimon, Cadmium, Cobalt und Strontium werden im großen Umfange für die Herstellung von Pigmenten, als Füllstoffe für Kunststoffe oder als Stabilisierer für Kunststoffe genutzt. Zu anderen bekannten Füllstoffen wie Bariumsulfat, Magnesiumsulfat, Natriumsulfat und Zinkverbindungen liegen keine Daten vor. Darüber hinaus werden verschiedene Metalle in der chemischen Industrie in großem Umfang eingesetzt. In Pigmenten finden sich zudem Cer, Chrom, Erbium, Lanthan, Rubidium, Scandium und Tellur. Einige Nutzungen sind in der folgenden Tabelle aufgeführt (Tab. 10-11).

Tab. 10-11: Pigmente, Kunststoffstabilisierer und chemische Nutzungen der Metalle, bezogen auf den gesamten Einsatz des Metalls in den Vereinigten Staaten bzw. weltweit. Bezugsjahr 2007 soweit nicht anders angegeben

Metall	Einsatz in den USA	Einsatz weltweit
Antimon	40 % feuerhemmende Mittel; 14 % Chemikalien	75 % Flammschutzmittel (Angerer et al. 2008)
Cadmium	8 % für Pigmente; 7 % Kunststoffstabilisierer	
Cobalt	32 % Chemikalien	9% Pigmente; 8% Chemikalien
Selen		20% Chemikalien und Pigmente (2003) (Matons / George 2005)
Strontium	7 % Pigmente und Füllstoffe	
Titan	57 % Farben; 26 % Kunststoffe (Farben); 13 % Papier (weißer Füllstoff) (TiO ₂)	
Bismut	18 % Chemie und Pharmazie	
Zinn		14 % Chemikalien (Angerer et al. 2008)

Quelle: USGS (2008)

Glasindustrie

Die Glasindustrie ist ein wichtiger Abnehmer von Metalloxiden. Der wichtigste Glasbildner ist Siliziumdioxid, dem verschiedene Metalloxide zugesetzt werden, um spezifische Eigenschaften der Gläser zu erhalten. In den Frontgläsern von Bildröhren werden beispielsweise größere Mengen von Bleioxiden oder Strontiumoxid verwendet. Weitere Oxide, vor allem in Spezialgläsern eingesetzt, sind diejenigen von Gallium und Samarium. Für Glasuren werden unter anderem Lithiumverbindungen eingesetzt. Bei der Glasherstellung werden große Mengen an Natriumcarbonat und Scandiumoxid eingesetzt. Als Glasreiniger, zum Polieren, werden Seltene Erden eingesetzt.

Tab. 10-12: Einsatz ausgewählter Metalle in der Glasindustrie, bezogen auf den gesamten Einsatz des Metalls weltweit bzw. in den Vereinigten Staaten. Bezugsjahr: 2007, sofern nicht anders angegeben

Metall	Einsatz weltweit	Einsatz in den USA
Antimon		11 % Keramik und Glas
Bleioxid	bis vor einiger Zeit hoher Anteil an der Bleiverwendung	
Selen	35 % Glasherstellung (2003) (Matons / George 2005)	
Seltene Erden		11 % Glasreiniger und Keramik (2006)
Strontium		2005 noch wichtigste Strontiumverwendung für Gläser

Quelle: USGS (2008)

Schmuck und Dentalbedarf

Die Edelmetalle werden in großem Umfang in der Schmuckindustrie sowie im Dentalbereich genutzt. Hierbei handelt es sich vor allem um Silber, Gold und Platin. Allerdings wird auch Quecksilber in Amalgamlegierungen in größeren Mengen eingesetzt. In der folgenden Tabelle sind die vorliegenden Werte zusammengefasst (Tab. 10-13).

Tab. 10-13: Metalle in der Schmuckindustrie, wo möglich bezogen auf die gesamte Verwendung des Metalls in den Vereinigten Staaten bzw. weltweit. Bezugsjahr 2007 soweit nicht anders angegeben.

Metall	Einsatz in den USA	Einsatz weltweit
Gold	84 % Schmuck; 10 % Dentalbedarf und anderes	
Platin		88 t Schmuck; (2002) (Wilburn, o.J., 67)
Silber		31 % Schmuck und Silberwaren; 1 % Münzen (2007) (Fortis 2008)

Quelle: USGS (2008)

Dr. Dominic Wittmer¹
Martin Erren¹
Christoph Lauwigi²
Michael Ritthoff¹
Christoph Dressler²

¹ Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie GmbH

² Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg

Umweltrelevante metallische Rohstoffe

Meilensteinbericht des Arbeitsschrittes 2.1 des Projekts
„Materialeffizienz und Ressourcenschonung“ (MaRess)

Teil 2: Untersuchungen zu ausgewählten Metallen:
Gallium, Gold, Indium, Mangan, Nickel,
Palladium, Silber, Titan, Zink, Zinn



Kontakt zu den Autor(inn)en:

Dominic Wittmer

Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie GmbH
Döppersberg 19, 42103 Wuppertal

Tel.: +49 (0) 202 2492 -181, Fax: -138
Mail: dominic.wittmer@wupperinst.org

**„Materialeffizienz und Ressourcenschonung“
(MaRes) – Projekt im Auftrag des BMU I UBA**

Projektlaufzeit: 07/2007 – 12/2010

Projektleitung:

Dr. Kora Kristof / Prof. Dr. Peter Hennicke

Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie GmbH
42103 Wuppertal, Döppersberg 19

Tel.: +49 (0) 202 2492 -183 / -136, Fax: -198 / -145
Mail: kora.kristof@wupperinst.org
peter.hennicke@wupperinst.org

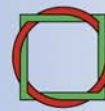
© Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie GmbH

Weitere Informationen zum Projekt

„Materialeffizienz und Ressourcenschonung“ (MaRes)
finden Sie unter **www.ressourcen.wupperinst.org**

Gefördert wird das Vorhaben im Rahmen des UFOPLAN
durch das BMU und das UBA, Förderkennzeichen: 3707 93 300

Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung
liegt bei den Autor(inn)en.



Wuppertal Institut
für Klima, Umwelt, Energie
GmbH

**Wuppertal Institut
in Kooperation mit**

BASF
Borderstep
CSCP
Daimler
demea – VDI / VDE-IT
ECN
EFA NRW
FhG IAO
FhG UMSICHT
FU Berlin
GoYa!
GWS
Hochschule Pforzheim
IFEU
Institut für Verbraucherjournalismus
IÖW
IZT
MediaCompany
Ökopol
RWTH Aachen
SRH Hochschule Calw
Stiftung Warentest
ThyssenKrupp
Trifolium
TU Berlin
TU Darmstadt
TU Dresden
Universität Kassel
Universität Lüneburg
ZEW



Bundesministerium
für Umwelt, Naturschutz
und Reaktorsicherheit

**Umwelt
Bundes
Amt** 
Für Mensch und Umwelt

0. Vorbemerkungen

0.1. Rahmen der Untersuchungen

Der Abschlussbericht zum Arbeitsschritt „Umweltrelevante metallische Rohstoffe“, der im Rahmen des Projektes „Materialeffizienz und Ressourcenschonung“ (MaRess)¹ erarbeitet wurde, ist in zwei Teile gegliedert:

- Der Hauptbericht (Teil I) ist das Kerndokument, der das generelle Vorgehen beschreibt, die Metallauswahl dokumentiert und die Gesamtergebnisse darstellt.
- Der Bericht zu den Untersuchungen ausgewählter umweltrelevanter Metalle umfasst die Ergebnisse von zehn inhaltlich eigenständigen Einzeluntersuchungen (der vorliegende Teil II). Ergebnisse, die über die Ebene der einzelnen Metalle hinausgehen, sind im Hauptbericht zusammengefasst.

Der Gegenstand, die Ziele und das generelle Vorgehen sind im Hauptbericht dargestellt. Ebenso sind zentrale Informationen wie die Erläuterung der Gesamtstruktur des Abschlussberichtes, das Abkürzungsverzeichnis, das Glossar sowie der Anhang im Hauptbericht platziert. Das Literaturverzeichnis hingegen ist aufgeteilt auf den Hauptbericht und die jeweiligen Metalluntersuchungen.

0.2. Ziel der Untersuchungen

Das Hauptziel der vertiefenden Untersuchungen der Metalle ist die Bereitstellung geeigneter Informationen über den Ist-Zustand der Umweltbelastungen und Materialverluste entlang den Lebenszyklen der Metalle, um Grundlagen für eine Analyse des Handlungsbedarfs und der Handlungsoptionen in Bezug auf metallische Stoffströme bereitzustellen. Ausführlichere Informationen auch zu den generellen Zielen des Arbeitsschrittes AS2.1 (gesamt) sind in Kap. 1.2 des Hauptberichts aufgeführt.

¹ Umweltforschungsplan des Bundesumweltministeriums, FKZ 3707 93 300

0.3. Struktur der Untersuchung

Die zehn vertiefende Untersuchungen zu den Metallen Gallium, Gold, Indium, Mangan, Nickel, Palladium, Silber, Titan, Zink, Zinn sind eigenständige Dokumente, die der folgenden gemeinsamen Struktur folgen:

Einleitung

In der Einleitung wird die *Relevanz* des Metalls hinsichtlich der Fragestellung dargestellt und dabei ausgewählte Problemfelder umrissen. Unter *Charakteristika* wird das technische Profil und das natürliche Vorkommen des Metalls beschrieben. Ebenso werden allgemeine Aussagen zur Umwelt- und Humantoxizität aufgeführt. Schließlich wird ein Überblick über die diversen *Anwendungsbereiche* gegeben, die sich aus den obengenannten Eigenschaften ergeben.

Umweltbelastungen und Materialverluste

In diesem Kapitel werden die Prozesse entlang des Lebenszyklus beschrieben und die zugehörigen Umweltbelastungen und Materialverlusten aufgeführt (in der Regel in absoluten Zahlen). Die Prozesse sind (Me=Metall): Abbau, Aufbereitung, Verarbeitung/Raffination/Produktion/Produktion Me-haltiger Produkte, Nutzung (Me-haltiger Produkte), Recycling (von Me), Me in die Deponien, Me in die Umwelt und andere Senken. Für eine ausführlichere Beschreibung siehe Kap. 5.2.2 im Abschlussbericht/Teil 1.

Für die untersuchten Prozesse werden die jeweils identifizierten Umweltbelastungen und Materialverluste tabellarisch zusammengefasst.

Fazit

Jeder Teilbericht schließt mit einem Fazit zu den Untersuchungen des jeweiligen Metalls. Das Fazit bietet Platz, um Charakteristika zusammenzufassen oder in Kürze zu diskutieren.

I. Gallium

Michael Ritthoff,
Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie

I.1. Einleitung

I.1.1. Relevanz

Gallium ist ein Element, das für mehrere Zukunftstechnologien von erheblicher Bedeutung ist. Galliumarsenid (GaAs) und Galliumnitrid (GaN) kommen sowohl in der Photovoltaik, als auch in Leuchtdioden (LED) zur Anwendung. Ein zusätzlicher Bedarf an Gallium entsteht durch den Einsatz von Galliumarsenid als Halbleiter in integrierten Schaltungen (engl.: *integrated circuits* / IC), insbesondere von Mobiltelefonen. Gallium steht damit in einem starken Wettbewerb zu Silizium. Im Gegensatz zu Silizium ist Gallium jedoch nur begrenzt verfügbar.

Die derzeit einzige ökonomisch verfügbare Rohstoffquelle des Galliums sind Laugen des Bayer-Verfahrens zur Aluminiumoxidherstellung, in denen in Abhängigkeit vom Mineralbestand des Aluminiumerzes Bauxit und der Prozessbedingungen bei der Gewinnung unterschiedliche Galliumkonzentrationen auftreten. Damit hängt die Verfügbarkeit von Gallium unmittelbar von der Aluminiumoxid- und der Aluminiumproduktion ab.

I.1.2. Charakteristika

Gallium gehört mit einer Konzentration von 0,0016 % in der Erdkruste zu den relativ seltenen Elementen (Greber 1999). Für Gallium bzw. Galliumverbindungen wird für die nächsten Jahre insbesondere durch die Optoelektronik eine starke Nachfragesteigerung erwartet (Angerer et al. 2009).

Der TMR (Globaler Materialaufwand, engl.: *Total Material Requirement*) von Gallium wurde bisher noch nicht detailliert analysiert, doch erste Abschätzungen gehen von Werten um 6 t/t Gallium aus (Bringezu 2000).

Gallium

Gallium ist ein silberweißes Metall mit einem Schmelzpunkt von 29,78 °C und einem Siedepunkt von 2.403 °C. Die Dichte festen Galliums beträgt 5,904 g/cm³ bei 24,6 °C, die Dichte flüssigen Galliums 6,095 g/cm³ bei 29,8 °C. Gallium ist ein Halbleiter, es bildet leicht mit Aluminium Legierungen von sehr geringer Festigkeit und löst sich gut in konzentrierter Natronlauge (Greber 1999). Beim Transport von Gallium sind besondere Sicherheitsmaßnahmen zu ergreifen, die verhindern, dass flüssiges Gallium in Kontakt mit Aluminium kommt, da hierbei durch die Bildung von Legierungen mit sehr geringer Festigkeit strukturelle Schäden an den Transportmitteln – etwa Flugzeugen – entstehen können.

Gallium wirkt ätzend und reizend auf Haut und Schleimhäute (Greber 1999, Alfa Aesar 2009). Die letale Dosis liegt für Gallium bei ca. 50 mg/kg Körpergewicht. Aufgrund der geringen Produktions- und Verwendungsmengen sowie des begrenzten und gut ausgebildeten Personenkreises der mit Gallium arbeitet, sind Vergiftungen durch Gallium jedoch ausgesprochen unwahrscheinlich¹. Es sind keine Vergiftungen durch industrielle Exposition beschrieben, neuere Untersuchungen liegen nicht vor (Greber 1999).

Metallisches Gallium hat fast keine technische Anwendung, es ist jedoch Ausgangsstoff für technisch genutzte Galliumverbindungen, die im Folgenden erläutert werden.

Galliumarsenid

Galliumarsenid (GaAs) ist eine dunkelgraue Verbindung mit einem Schmelzpunkt von 1.238 °C und einer Dichte von 5,31 g/cm³. Galliumarsenid reizt Haut und Schleimhäute und ist nachweislich humankarzinogen. Es ist sehr giftig für Fische (Wassergefährdungsklasse 3) (Alfa Aesar 2008a). Es ist die in technischen Anwendungen am häufigsten eingesetzte Galliumverbindung und wird als Halbleiter in integrierten Schaltkreisen (IC), in der Photovoltaik und in LED eingesetzt.

Gallium(III)nitrid

Gallium(III)nitrid (GaN) ist ein gelber Verbindungshalbleiter. Es sublimiert bei 800 °C und hat eine Dichte von 6,1 g/cm³. Galliumnitrid reizt Augen und Schleimhäute, eine Sensibilisierung² durch Hautkontakt ist möglich (Alfa Aesar 2009). Galliumnitrid wird insbesondere als Halbleiter in Leuchtdioden eingesetzt.

¹ Toxikologisch weitaus bedenklicher sind Stoffe die zusammen mit Gallium bei der Herstellung von Verbindungshalbleitern eingesetzt werden. Die hierbei eingesetzten Stoffe Arsenwasserstoff und Phosphorwasserstoff sind hochtoxisch. Aufgrund ihres starken Geruchs nach Knoblauch bereits unterhalb der Gefährdungsschwelle können sie jedoch leicht wahrgenommen werden und Vergiftungen leicht verhindert werden.

² Fehlgeleitete spezifische Immunreaktion nach einem Erstkontakt. Es kann bei einem Zweitkontakt zu einer allergischen Reaktion kommen, z.B. Kontaktekzem.

Galliumphosphid

Galliumphosphid (GaP) ist ein helloranger Verbindungshalbleiter, es hat einen Schmelzpunkt von 1.348 °C und eine Dichte von 4,1 g/cm³. Galliumphosphid reizt Haut und Schleimhäute, die letale Dosis LD₅₀³ liegt bei 8.000 mg/kg (Alfa Aesar 2008b). Galliumphosphid wird vor allem als Halbleiter in LED eingesetzt.

I.1.3. Anwendungsbereiche

Die Produktion von primärem Gallium wurde vom *United States Geological Survey* (USGS) für das Jahr 2000 auf ca. 100 t geschätzt, für das Jahr 2008 auf 95 t (USGS 2001, USGS 2009).

In den Vereinigten Staaten werden Gallium und Galliumverbindungen vor allem in IC (ca. 63 %), Optoelektronik (Laserdioden, LED, Sensoren) (ca. 22 %) sowie Forschung und Entwicklung (ca. 15 %) eingesetzt (USGS 2005, NRC 2008) (Abb. I-1). Trotz des Booms in der Optoelektronik ist nicht davon auszugehen, dass der verstärkte Einsatz alleine in diesem Bereich kurzfristig zu einer bedeutenden Steigerung der Gesamtnachfrage nach Gallium kommen wird. Der Galliumbedarf für einzelne LED ist sehr gering: Ein Kilogramm Gallium ist ausreichend für die Herstellung von 500.000 LED (Kerny 1989).

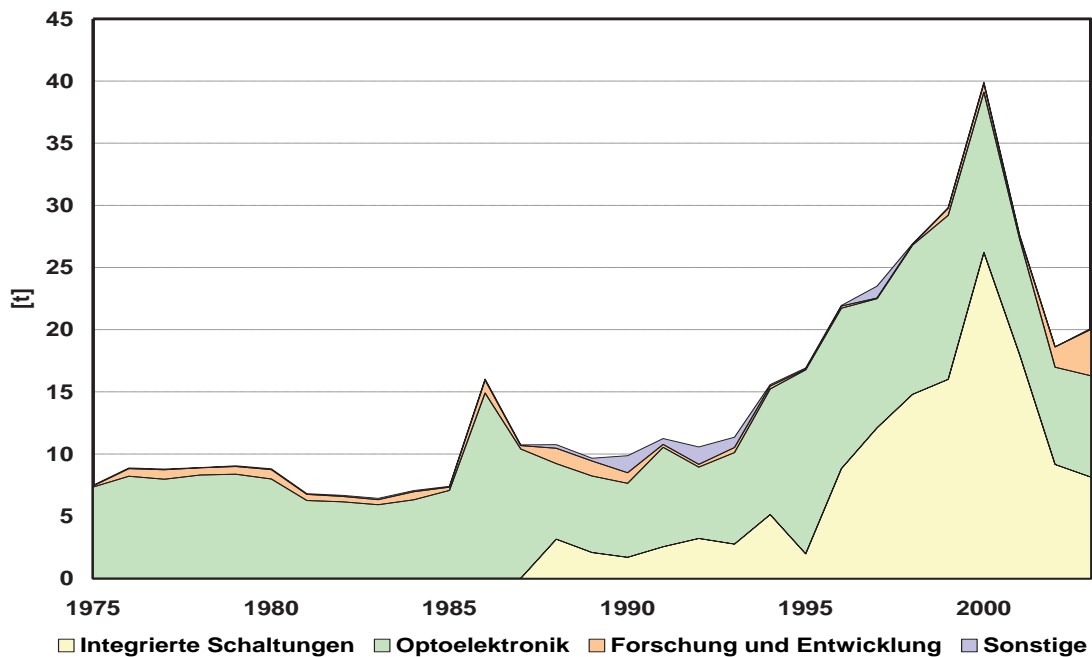
Gallium wird ganz überwiegend in den Verbindungshalbleitern Galliumarsenid und Galliumnitrid eingesetzt, wobei Galliumarsenid stark dominiert (Anteil in den Vereinigten Staaten an der gesamten Galliumverwendung 95 %). Galliumarsenid wird in der Optoelektronik in Laserdioden, Leuchtdioden, Photodetektoren und Solarzellen sowie bei der Herstellung von IC eingesetzt (vgl. Abb. I-2). Die prozentuale Verteilung von Galliumarsenid auf verschiedene Anwendungen beläuft sich in den Vereinigten Staaten auf 65 % in IC, 29 % in der Optoelektronik und 6 % in Forschung⁴, Entwicklung und sonstigen Anwendungen (Jaskula 2009b). Galliumnitrid wird insbesondere in LED eingesetzt, Produktions- und Verwendungsdaten hierzu sind nicht verfügbar.

Genaue Angaben zur Galliumverwendung in Deutschland oder Europa liegen nicht vor. Aufgrund der begrenzten Anzahl möglicher Einsatzbereiche (IC und Optoelektronik) wird davon ausgegangen, dass die Verteilung bei der Verwendung ähnlich wie in den Vereinigten Staaten ist. Die Verwendung in IC ist eher rückläufig, die Verwendung in der Optoelektronik eher zunehmend (vgl. Abb. I-1).

³ Der LD₅₀-Wert gibt die Konzentration an, bei der eine Stoffkonzentration bei der Hälfte der Menschen tödlich ist. Sie wird auf Kilogramm Körpergewicht bezogen.

⁴ Für das Gallium Neutrino Observatory, Grand Sasso, Italien, wurden insgesamt 30 t Gallium benötigt (www.lngs.infn.it). Der Anteil der Forschung am Galliumbedarf war daher zeitweilig deutlich höher.

Abb. I-1: Anwendungsbereiche von Gallium in den Vereinigten Staaten im Zeitraum 1975-2005



Quelle: USGS (2005)

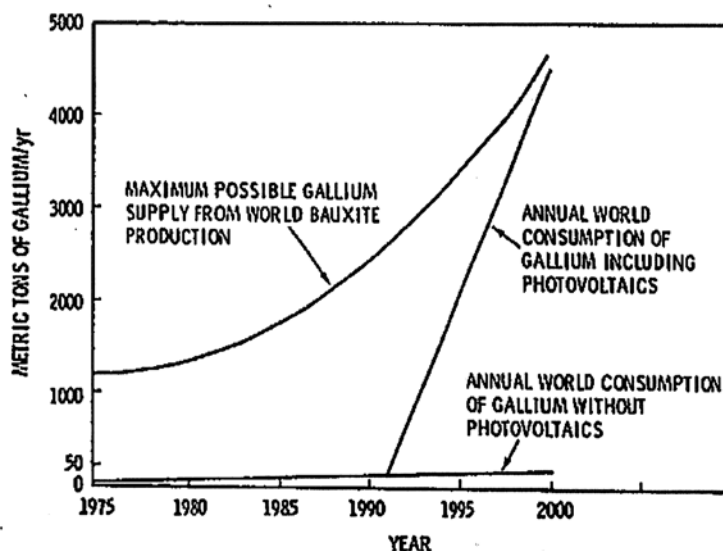
Die vielfach diskutierte Anwendung von Gallium in der Photovoltaik hat bisher keine Relevanz erreicht. Das liegt jedoch nicht an einer mangelnden Verfügbarkeit von Gallium, denn die Produktionskapazitäten für Gallium werden gegenwärtig nicht vollständig ausgenutzt. Seit einiger Zeit wird jedoch wieder verstärkt der (mögliche) Bedarf an Gallium für die Anwendungen der Photovoltaik diskutiert (z.B. Angerer et al. 2009).

Box 1: Gallium in der Photovoltaik

Diskussionen über eine steigende Nachfrage nach Gallium sind nicht neu, sondern gab es bereits in den 1980er Jahren. Für den Zeitraum zwischen 1983 und 2000 wurde in einer Studie von einer jährlichen Nachfragesteigerung nach Gallium von 5-10 % ausgegangen (Wardell / Davidson 1987).

Andere Einschätzungen gingen noch deutlich weiter und erwarteten zwischen 1991 und 2000 alleine für die Photovoltaik einen Bedarf an Gallium von über 25.300 t, davon sollten alleine im Jahr 2000 rund 4.500 t benötigt werden (Lloyd / Long 1980). Nach diesen Einschätzungen sollte die zukünftige Nachfrage nach Gallium überwiegend von der Photovoltaik getrieben werden (Lloyd / Long 1980).

Abb. I-2: Abschätzung der maximal möglichen Galliumproduktion aus Bauxit, erwarteter jährlicher Einsatz von Gallium getrennt nach Photovoltaik und andere Anwendungen als Photovoltaik



Quelle: Lloyd und Long (1980)

Diese prognostizierte Nachfragesteigerung ist nicht eingetreten, obwohl Dünnschicht-Photovoltaik, die teils auf Gallium basiert, gegenüber herkömmlicher Photovoltaik (Dickschicht-Photovoltaik), die auf Silizium basiert, bei großen Photovoltaikanlagen eine höhere Rentabilität aufweist. Ein wichtiger Grund für die geringe Nachfrage nach Gallium dürften die relativ hohen Kosten der Gewinnung sein (vgl. Box 2), die auch durch bessere Eigenschaften gegenüber anderen Materialien nicht kompensiert werden können.

I.2. Umweltbelastungen und Materialverluste

I.2.1. Abbau

Gallium wird derzeit ausschließlich⁵ als Nebenprodukt bei der Aluminiumoxidgewinnung im Bayer-Verfahren gewonnen (Jaskula 2009, Greber 1999). Die Herstellung von Aluminiumoxid erfordert den Abbau von Bauxit, was mit einer Landschaftsveränderung durch Flächeninanspruchnahme (Extraktion, Abfälle) verbunden ist.

Der Galliumgehalt der Lösungen im Bayer-Verfahren hängt von den Extraktionsbedingungen und dem Galliumgehalt im Bauxit ab (0,003-0,008 %, nach Angaben des U. S. Geological Survey durchschnittlich 0,005 %) (Greber 1999). Die Lösungen aus dem Bayer-Verfahren enthalten pro Liter durchschnittlich 80 g Aluminiumoxid, 160 g Natriumoxid und 0,1-0,3 g Gallium (Bautista 2003).

Böhmreiche Bauxite benötigen höhere Extraktionstemperaturen, ihre Extraktion ist daher mit einem höheren Energieverbrauch verbunden. Aufgrund der höheren Prozesstemperaturen kommt es jedoch zu einer weitergehenden Lösung des Galliums, weshalb der Galliumgehalt dieser Lösungen höher ist (Greber 1999). Aufgrund des geringeren Energieverbrauchs werden derzeit jedoch böhmarme Bauxite bevorzugt.

Der große Vorteil der Gewinnung von Gallium aus Lösungen des Bayer-Verfahrens besteht darin, dass in diesen Lösungen das Gallium bereits gelöst vorliegt und daher „vergleichsweise einfach“ extrahiert werden kann.

Daneben existieren weitere mögliche Rohstoffe für die Galliumgewinnung. Die Nutzung von anderen Galliumrohstoffen neben Bauxit ist jedoch bisher nicht notwendig, da die derzeitige Produktionskapazität von Gallium nicht vollständig genutzt wird. Gegenüber einer Kapazität von ca. 184 t werden derzeit nur ca. 95 t Gallium pro Jahr hergestellt (USGS 2009), sodass eine Verdoppelung der Produktion aus den bestehenden Anlagen möglich wäre. Das unterstreicht ein derzeit relativ geringes ökonomisches Interesse an Gallium (Classen et al. 2009).

Alternativen zum Bayer-Verfahren

Die größten Vorräte an Gallium finden sich - neben aluminiumhaltigen Erzen - in Phosphaten und Kohle. Die Konzentrationen sind jedoch so gering, dass sich eine Gewinnung nicht lohnt. Das gilt auch für die Flugaschen aus Kohlekraftwerken (Greber 1999). Hinzu kommt, dass weder für Phosphate, noch für Flugaschen ein Prozess bekannt ist, in dem sich Gallium mit vergleichbar geringem Aufwand konzentrieren und extrahieren ließe wie bei den Lösungen des Bayer-Verfahrens. Daher ist nicht davon auszugehen, dass diese Rohstoffe in absehbarer Zeit Bedeutung für die Galliumge-

⁵ Die Mine von Apex (Vereinigte Staaten) ist die einzige jemals genutzte Mine zur Gewinnung von Gallium und Germanium als Hauptprodukt. Die Förderung wurde jedoch bereits in der Einfahrphase aus technischen und finanziellen Gründen eingestellt (Kerny 1989, Jaskula 2009b).

winnung erlangen (Katrak / Agarwal 1981). Da aus Flugaschen z. T. auch Germanium gewonnen werden kann, ist aus ökonomischer Sicht eine Nutzung von ihnen wahrscheinlicher als von Phosphaten; bisher gibt es jedoch auch hierbei keine technische Umsetzung.

Als weitere Option zur Galliumgewinnung werden sulfidische Erze (z. B. Zinksulfiderze) genannt. Eine Gewinnung aus diesen Erzen (Lloyd / Long 1980) soll mit nur vergleichsweise geringen Mehrkosten gegenüber der Gewinnung aus Bauxit (ca. 500 statt 400 \$/kg Gallium) verbunden sein (Katrak / Agarwal 1981), neuere Angaben hierzu sind nicht verfügbar. Laugung mit Säure kann zur Gewinnung von Gallium und Germanium aus Zinkerzrückständen eingesetzt werden. Dabei werden 400-1.600 lb.⁶) pro Tonne Rückstand eingesetzt. Die Extraktion erfolgt bei 80 °C (Wardell / Davidson 1987).

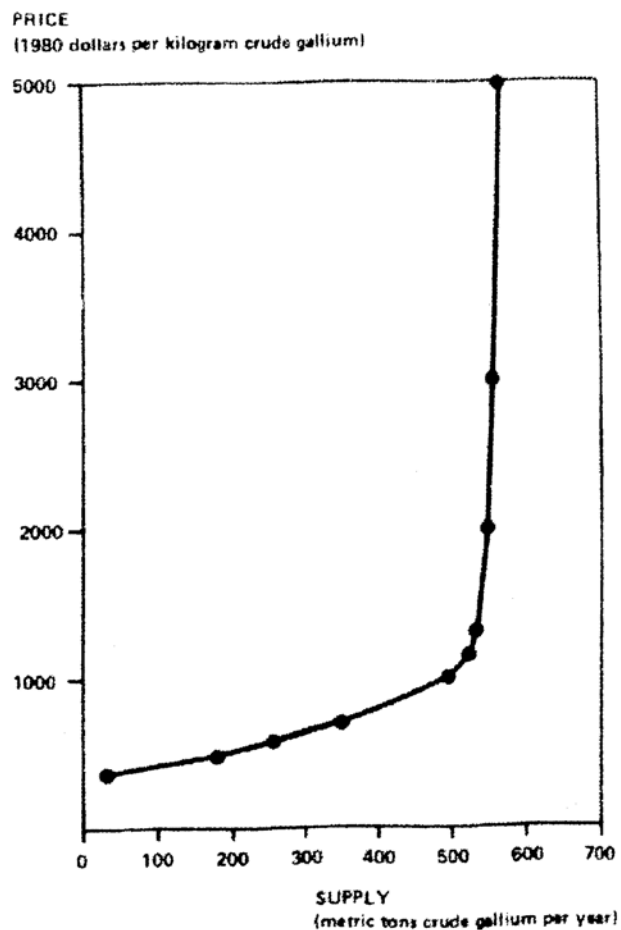
⁶ 1 lb. = 0,45359237 kg

Box 2: Kosten der Galliumgewinnung

Die Preise für Gallium hängen stark von den Ausgangsrohstoffen ab. Als Nebenprodukt der Aluminiumproduktion kann eine recht begrenzte Menge Gallium zu vergleichsweise niedrigen Kosten gewonnen werden. Bei größeren Mengen käme es jedoch aufgrund von anderen Ausgangsmaterialien und Gewinnungsprozessen schnell zu stark steigenden Kosten (vgl. Abb. I-3).

An diesem Zusammenhang hat sich bis heute grundsätzlich nichts geändert. Die Herstellungsprozesse nutzen die bereits in den 1980er Jahren genutzten Rohstoffe, weitere Verfahren konnten sich bisher nicht etablieren. Aktuellere Werte müssten freilich die veränderte Aluminiumproduktion und ihre Kosten berücksichtigen.

Abb. I-3: Abschätzung des Galliumpreises in Abhängigkeit vom Galliumangebot



Quelle: Lloyd und Long (1980)

Die Umweltbelastung und Materialverluste bei der Gewinnung von Gallium sind in Tab. I-1 zusammengefasst.

Tab I-1: Umweltbelastung und jährliche Materialverluste bei der Gewinnung von Gallium

Erztypen	Umweltbelastung	Materialverluste	Bemerkungen
Bauxit	Keine Allokation der Bauxitgewinnung auf Gallium vorgenommen.	Unvollständige Extraktion Menge nicht bekannt	
Germanit	Derzeit keine technische Umsetzung.	Derzeit keine technische Umsetzung. Menge nicht bekannt	
Kohle			
Phosphate			
Flugaschen			

I.2.2. Aufbereitung

Da Gallium heute nur als Nebenprodukt des Bayer-Verfahrens gewonnen wird, werden im Folgenden drei Verfahren zur Herstellung von Gallium aus den Laugen des Bayer-Verfahrens erläutert.

Komplexbildung

Hierbei wird die Eigenschaft eines Komplexbildners (Kelex-100⁷ oder Duolite CS-346) in Petroleum genutzt, Gallium zu extrahieren (vgl. Abb. I-4). Nachdem die meisten Verunreinigungen mit verdünnter Säure herausgelöst sind, wird das Gallium mit konzentrierter Säure extrahiert. Die Galliumkonzentration dieser Lösung wird durch Ionentauscher erhöht, bevor aus der konzentrierten Lösung das Gallium elektrolytisch abgetrennt wird. Obwohl bei diesem Verfahren ein großer Teil der Säuren zurückgewonnen wird, fallen dennoch beträchtliche Mengen an verunreinigter Säure an. Die Herstellung von Gallium über Komplexbildner erfolgt in Japan und Frankreich (Greber 1999). Aufgrund des temperaturabhängigen Reaktionsverlaufs wird die Extraktion statt mit 28 °C (dem Schmelzpunkt von Gallium) mit höheren Temperaturen zwischen 50 °C und 75 °C durchgeführt (Bautista 2003).

Elektrolytische Herstellung

Dieses Verfahren wird zunehmend durch das Verfahren der Komplexbildung ersetzt, doch wird es noch in einer Reihe von Produktionsstätten eingesetzt. Hierbei nutzt man die Eigenschaft des Galliums, mit Quecksilber ein Amalgam zu bilden. Aus diesem Amalgam kann das Gallium mit Natronlauge herausgelöst werden. Nachteilig an dem Verfahren ist, dass es (a) hohe Galliumgehalte in der Lösung von über 150 mg/l benötigt, die in modernen Anlagen, welche mit böhmitarmen Bauxiten arbeiten, nicht er-

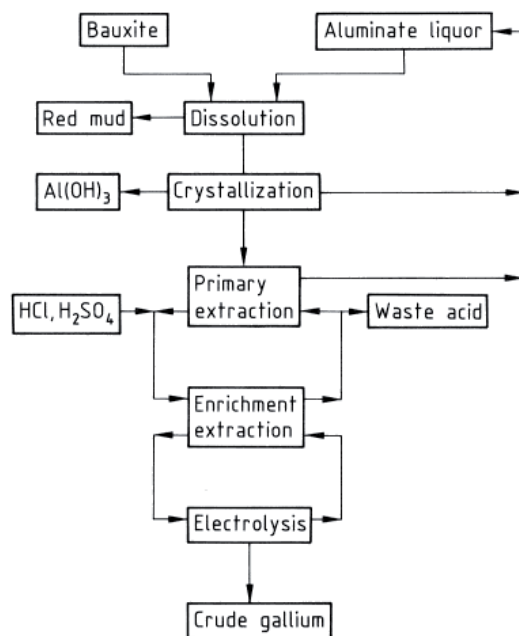
⁷ 7-(3,3,5,5-Tetramethyl-1-vinylhexyl)quinolin-8-ol; C₂₁H₂₉NO

reicht werden können, (b) sehr empfindlich gegenüber metallischen Verunreinigungen ist und (c) den Einsatz von Quecksilber erfordert. Aus diesen Gründen werden neue Anlagen für eine elektrolytische Herstellung von Gallium nicht mehr gebaut. Das Verfahren hat jedoch noch eine erhebliche Relevanz. Auch die Produktion von Gallium in Deutschland erfolgt noch nach diesem Verfahren.

Fraktionierte Ausfällung

Dieses Verfahren wird nur noch in China im nennenswerten Umfang eingesetzt. Mit ihm werden jährlich ca. 5 t Gallium produziert. Es erfordert zahlreiche Prozessschritte, ist Energie-, Arbeits- und kostenintensiv und insgesamt unwirtschaftlich.

Abb. I-4: Herstellung von Gallium mit Komplexbildnern



Quelle: Greber (1999)

Die Herstellung von Gallium ist in der Literatur nur grob beschrieben. Insbesondere fehlen Hinweise zu typischen Umweltbeeinträchtigungen. Aufgrund der eingesetzten Betriebsstoffe erscheinen bei der Gewinnung mit Komplexbildnern insbesondere Abwasserbelastungen durch Säuren und Kohlenwasserstoffe als relevant. Zudem kann bei der elektrolytischen Gewinnung Quecksilber emittiert werden.

Bei der Herstellung von 1 kg Gallium mit Komplexbildnern kann von einem Verbrauch von:

- 28,4 l Kelex 100 p ($C_{21}H_{29}NO$),
- 0,11 l Versatic 10 ($C_{10}H_{20}O_2$),
- 0,17 l n-decanol ($C_{10}H_{22}O$),
- 1,68 l Petroleum und
- 2,18 l Schwefelsäure (H_2SO_4)

ausgegangen werden (Classen et al. 2009). Für die alternativen Verfahren sind keine Daten verfügbar.

Tab. I-2: Umweltbelastung und jährliche Materialverluste bei der Aufbereitung von Gallium

Verfahren	Umweltbelastung	Materialverluste	Bemerkungen
Gewinnung mit Komplexbildnern	verunreinigte Säuren in Abwasser Freisetzung von Komplexbildnern (Kohlenwasserstoffe)	nicht bekannt	
Elektrolytische Gewinnung	Hg-Belastung in Abluft und Abwasser möglich	nicht bekannt	
Fraktionierte Ausfällung	nicht bekannt	nicht bekannt	

I.2.3. Raffination

Die Verarbeitung von Gallium (Raffination) ist in der Regel örtlich unabhängig von der Produktion von Rohgallium. So befindet sich die größte Raffination von Gallium in Frankreich, obwohl es keine Produktion von Rohgallium besitzt; demgegenüber verfügt Deutschland trotz einer großen Galliumproduktion über keinerlei Kapazitäten für eine Galliumraffination (Jaskula 2009a).

Nach der Herstellung von Rohgallium wird dieses durch Filtration gereinigt, wodurch man Gallium mit 99,9-99,99 % Gallium erhält. Für die Raffination von Gallium werden je nach Reinheitsgrad unterschiedliche Verfahren stufenweise angewendet:

- Eine Flüssig-Flüssig-Extraktion ist als erster Raffinationsschritt üblich (Bautista 2003). Als Alternative ist eine Wäsche mit Säuren und Laugen möglich.
- Elektrochemische Verfahren, Erhitzung im Vakuum mit Abtrennung von leicht verdampfenden Verunreinigungen und fraktionierte Destillation flüssiger Galliumverbindungen können zur weiteren Reinigung eingesetzt werden (Bretèque 1980, Classen et al. 2009).
- Für die Herstellung von hochreinem Gallium werden fraktionierte Kristallisation, Einkristallwachstum und Zonenschmelzen eingesetzt (Bautista 2003, Kerny 1989).

Für die fraktionierte Kristallisation wird von einem Energieverbrauch von 0,0465 kWh/kg Gallium ausgegangen (Classen et al. 2009). Das wichtigste Produkt der genannten Verfahren sind Gallium-Einkristalle.

Bei den unterschiedlichen Raffinationsverfahren kann es zu Abwasserbelastungen durch zur Reinigung eingesetzte Chemikalien kommen (Säuren, Laugen und Lösungsmittel). Daneben kann auch Gallium emittiert werden.

Insbesondere bei den eingesetzten Verfahren zur Herstellung hochreinen Galliums kann es zu erheblichen Galliumverlusten kommen. Beim Zonenschmelzen (auch für die Herstellung von Halbleiter-Silizium eingesetzt) sammeln sich die Verunreinigungen im Endstück des Galliumkristalls, welches abgetrennt wird. Da der Vorgang abhängig von den vorhandenen Verunreinigungen und der gewünschten Reinheit mehrfach wiederholt werden muss, können sich unter Umständen erhebliche Verluste ergeben. Hierzu konnten jedoch keine Literaturangaben gefunden werden.

Bei der Herstellung von Galliumarsenid besteht die Gefahr von Gallium- und Arsen-Emissionen in die Luft.

Tab. I-3: Umweltbelastung und jährliche Materialverlust bei der Verarbeitung von Gallium

Verfahren	Umweltbelastung	Materialverluste	Bemerkungen
Elektrolytische Reinigung	Säureeintrag in aquatische Systeme Wasser mit Gallium	nicht bekannt, nicht beschrieben	
Flüssig-Flüssig-Extraktion	Mögliche Freisetzung von Lösungsmitteln beim Verdampfen des Lösungsmittels	nicht bekannt	Eingesetzte Lösungsmittel nicht beschrieben.
Zonenschmelzen	nicht bekannt	Galliumverluste durch abgetrennte Enden mit den angereicherten Verunreinigungen, Mengen unbekannt	
Einkristallwachstum	nicht bekannt	Restschmelze, Mengen nicht bekannt	

I.2.4. Produktion galliumhaltiger Produkte

Gallium wird überwiegend in Form von Galliumarsenid (GaAs) eingesetzt. Es wird hierbei stets aufgrund seiner Eigenschaft als Halbleiter genutzt. Das umfasst die Anwendung in integrierten Schaltkreisen (IC), in der Optoelektronik (z.B. LED), aber auch in der Photovoltaik. Die Herstellung von Galliumarsenid-Einkristallen erfolgt durch Kristallzüchtung im Tiegelziehverfahren aus Gallium und Arsen. Hierbei können Einkristalle mit typischen Durchmessern von 150 mm (in Einzelfällen bis 200 mm) für Wafer mit

entsprechenden Durchmessern hergestellt werden (Wikipedia 2009). Schichten von Galliumarsenid können auch epitaktisch hergestellt werden.

Neben Galliumarsenid kommt auch Galliumphosphid (GaP) in Halbleitern und vergleichbaren Einsatzgebieten zur Anwendung.

Bei der Herstellung der Wafer aus Einkristallen treten erhebliche Schneidverluste und Bruch auf. Der Anteil der Schneidverluste hängt von der Waferdicke und dem eingesetzten Sägeverfahren ab. Bei einer typischen Waferdicke von 675 µm bei 150 mm-Wafern und einer durchschnittlichen Schnittbreite von 300 µm beträgt der Verlust beim Schneiden bereits ca. 30 % (Wikipedia 2009).

Demgegenüber dürften die Verluste beim sich anschließenden Polieren geringer sein. Hierbei kommen jedoch zusätzlich Poliermittel (Aluminiumoxid oder Cer(IV)-oxid) zum Einsatz. Beide Poliermittel sind nicht umweltgefährdend.

Gallium kann sowohl bei der Herstellung von Galliumarsenid-Einkristallen, als auch bei der epitaktischen⁸ Anwendung mit Abscheidung aus der Gasphase emittiert werden.

Bei epitaktischer Anwendung wird Arsen als Arsenwasserstoff bzw. Phosphor als Phosphorwasserstoff eingesetzt. Sowohl Arsenwasserstoff als auch Phosphorwasserstoff sind hochtoxisch.

⁸ Kristallwachstum mit einer kristallographischen Ausrichtung, die sich an der Kristallstruktur eines anderen Kristalls orientiert. In der technischen Anwendung kann dies z. B. durch eine Ausscheidung aus der Gasphase (Gasphasenepitaxie) erfolgen.

Tab. I-4: Umweltbelastungen und jährliche Materialverluste bei der Produktion von galliumhaltigen Produkten

Anwendungsbereich	Produkt	Umweltbelastung	Materialverluste	Bemerkungen
Gallium in Halbleitern	GaAs GaP	Potenziell: Luftbelastung durch im Prozess eingesetzten Arsenwasserstoff und Phosphorwasserstoff	nicht bekannt	Epitaktische Anwendung
	GaAs	Potenziell: Emission von Gallium- und Arsenstaub und -dampf	nicht bekannt	Einkristallzüchtung
Waferproduktion	Schneiden von Wafern	nicht bekannt	Schneidschlämme, Bruch > 30 %	
	Polieren von Wafern	nicht bekannt	Läppschlämme	

I.2.5. Nutzung

Die Nutzung von Gallium ist bei den beiden dominierenden Anwendungen in IC und in der Optoelektronik nicht mit Umweltbelastungen verbunden.

IC auf der Basis von Galliumarsenid werden überwiegend in Mobiltelefonen eingesetzt. Eine zuverlässige Einschätzung des Bestandes an Gallium in Mobiltelefonen ist jedoch ausgesprochen schwierig. Zwar werden jedes Jahr viele Mobiltelefone nach nur kurzer Nutzungsdauer ersetzt, es ist jedoch unklar, ob oder zu welchem Anteil die ersetzten Geräte entsorgt werden oder ungenutzt im Bestand verbleiben.

Gallium in der Optoelektronik (z.B. LED) hat in der Regel eine längere Nutzungsdauer. Sie hängt in hohem Maße von dem Produkt ab, in dem die LED eingesetzt werden.

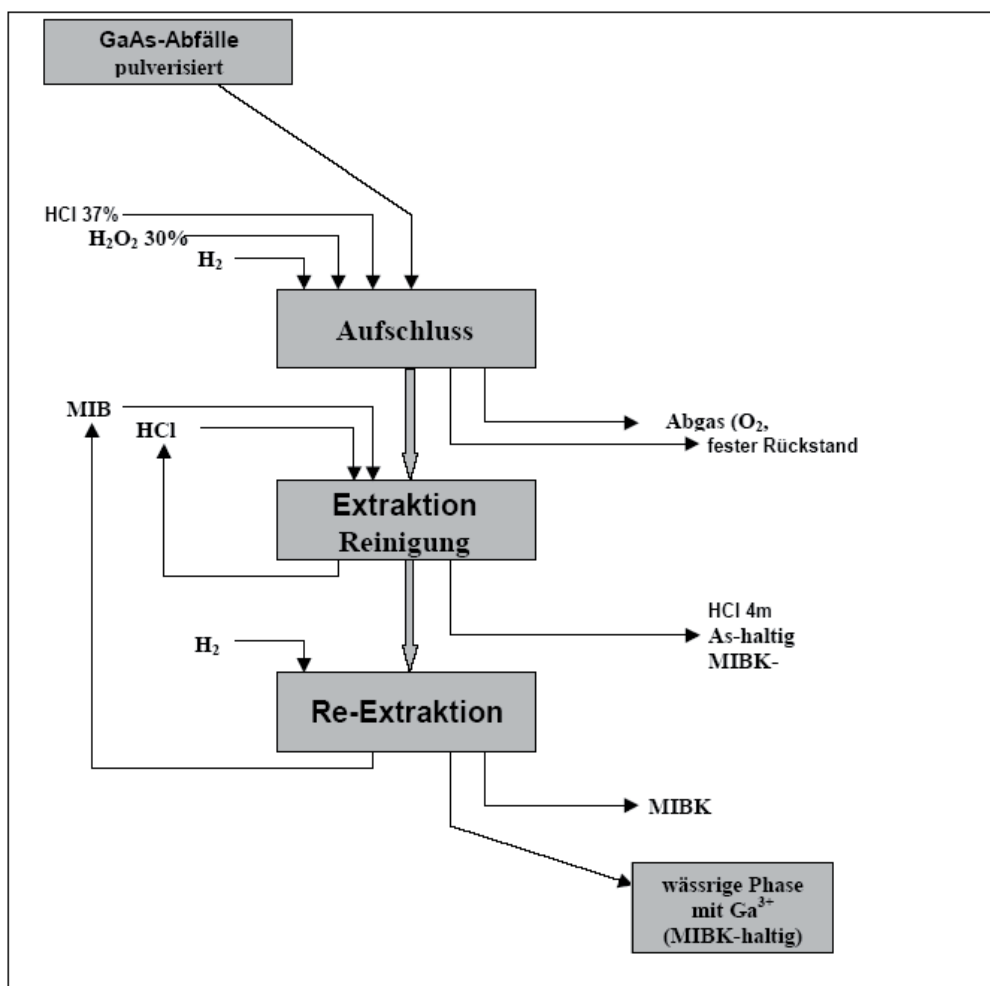
In beiden Fällen scheitert eine zuverlässige Einschätzung des Galliums im Bestand einerseits daran, dass die Nutzungsdauer bzw. die Dauer des Verbleibs beim Kunden unbekannt sind, andererseits der Einsatz des Galliums bezogen auf verschiedene Anwendungen bekannt ist, nicht jedoch die Verluste während des Herstellungsprozesses und damit auch der Galliumgehalt in den Produkten.

I.2.6. Recycling

Ein Recycling von Gallium und Galliumverbindungen erfolgt insbesondere bei Produktionsabfällen. Nach USGS (2009) liegt die Recyclingkapazität für Gallium bzw. Galliumverbindungen bei 78 t/a. Die recycelte Menge Gallium ist deutlich geringer; sie wird hier auf ca. 40 t/a geschätzt.

Recyclingprozesse für Gallium und Galliumverbindungen sind in kleinen und mittelständischen Unternehmen aufgrund des hohen Aufwands bisher nicht möglich (Herbell / Peil 2001). Das Recycling von Galliumarsenid, der wichtigsten Galliumverbindung, ist aufwendig und erfordert verschiedene Verfahrensschritte (Herbell / Peil 2001). Im Rahmen dieses Verfahrens werden Galliumarsenid-Abfälle zerkleinert, aufgeschlossen, filtriert und extrahiert. Das Recycling folgt dem Schema in Abb. I-5.

Abb. I-5: Recyclingverfahren für Gallium aus galliumarsenidhaltigen Abfällen (pulverisiert) mit zu den jeweiligen Verfahrensschritten gehörenden Stoffströmen. Die in den einzelnen Prozessen eingesetzten Substanzen werden als Pfeile von links dargestellt, die Produkte der Prozesse werden als Pfeile nach rechts aus den Prozessen herausgeführt



Quelle: Herbell und Peil (2001)

Die in dem Verfahren zum Aufschluss eingesetzten Chemikalien können nicht im Kreislauf geführt werden. Für den Aufschluss von einem Kilogramm galliumarsenidhaltiger Abfälle werden benötigt:

- 10 l Salzsäure, konz.;
- 10 l Wasserstoffperoxid 30 % und
- 9 l Wasser.

Für die sich dem Aufschluss anschließende Extraktion werden benötigt:

- 100 l Methylisobutylketon,
- 100 l Salzsäure 4 M und
- 25 l Wasser (Reextraktion).

Die bei der Extraktion eingesetzten Stoffe können im Kreislauf geführt werden. Die eingesetzte Salzsäure muss allerdings nach einiger Zeit ausgetauscht werden, wobei der Verbrauch mit 10 l/kg galliumarsenidhaltiger Abfälle angegeben wird (Herbell / Peil 2001).

Mit diesem Verfahren lässt sich ein großer Teil des in den Reststoffen enthaltenen Galliums (und anderer Inhaltsstoffe) zurückgewinnen. Die ermittelten Rückgewinnungsquoten können der Tab. I-5 entnommen werden.

Tab. I-5: Absolute und relative (bezogen auf Gehalt in den Produkten) Mengen der Elemente Gallium, Arsen, Indium und Phosphor. Eingesetzte Menge des galliumarsenidhaltigen Abfallpulvers: 16,9 g

Produkte	Gallium		Arsen		Indium		Phosphor	
	mg	%	mg	%	mg	%	mg	%
Abfallpulver	6.760	100,00	8.370	100,00	680	100,00	170	100,00
Aufschlusslösung	6.542	96,78	7.700	92,00	695	102,21	136	80,00
Raffinat	53	0,78	7.200	86,02	381	56,03	130	76,47
Reinigungslösung 1	13	0,19	390	4,66	154	22,65	16	9,41
Reinigungslösung 2	13	0,19	27	0,32	57	8,38	9	5,29
Reextrakt	6.300	92,20	11	0,13	42	6,18	5	2,94

Quelle: Herbell und Peil (2001)

Der Aufschluss der Galliumarsenidabfälle ist stark exotherm und schwer zu kontrollieren. Es besteht die Gefahr, dass hochtoxischer Arsenwasserstoff entsteht. Während des Aufschlusses werden Prozesslösungen mit einem hohen Gehalt an hochtoxischem und kanzerogenem Arsen eingesetzt.

Tab. I-6: Umweltbelastung und jährliche Materialverluste beim Rezyklieren von Gallium

rezyklierter Stoffstrom	Umweltbelastung	Materialverluste	Bemerkungen
Neuschrott	Wasserbelastung durch Säuren und Arsen	Menge nicht bekannt. Beim Recycling ca. 10 % Verlust	
(Alt-)Schrott	nicht bekannt	nicht bekannt	es liegt keine Prozessbeschreibung vor

I.2.7. Gallium in die Deponien

Gallium kommt vor allem in Elektronikprodukten vor. Diese sollten daher als Elektronikschrott gesammelt und einem Recycling bzw. einer sicheren Entsorgung zugeführt werden. Dennoch ist es nicht auszuschließen, dass galliumhaltige Produkte über den Hausmüll behandelt bzw. unbehandelt in die Deponien gelangen.

Deponie-Fractionen

Da Gallium in der Regel in IC und LED eingesetzt wird, ist nicht davon auszugehen, dass es auf Hausmülldeponien schnell freigesetzt wird. Analysen zur Expositionsabschätzung liegen freilich nicht vor.

Aufgrund der geringen möglichen Frachten ist jedoch davon auszugehen, dass innerhalb von Siedlungsabfalldeponien der Galliumgehalt durch Einträge von galliumhaltigen Produkten im Bereich der durchschnittlichen natürlichen Galliumkonzentration liegen wird.

Tab. I-7: Umweltbelastungen und jährliche Materialverluste durch Eintrag von Gallium in die Depo-
nien

Fraktion/Deponietyp	Umweltbelastung	Materialverluste	Bemerkungen
GaAs in Elektronikprodukten	Grund- und Oberflächenwasser. Gefährdung für Gewässerorganismen	Mengen unbekannt	kann aufgrund des unklaren Verbleibs in Produkten nicht abgeschätzt werden.

I.2.8. Gallium in die Umwelt und andere Senken

keine Angaben möglich

I.3. Fazit

I.3.1. Verbesserungspotential

Umweltbelastungen

Die mangelhafte Informationslage hinsichtlich der Herstellungsverfahren von Gallium und seinen Produkten gestattet es kaum, Aussagen zur Verringerung der Umweltbelastung bei der Herstellung von Gallium zu machen. Die Nutzung von Gallium in Produkten ist mit keinen oder allenfalls geringen Umweltbelastungen verbunden, daher können auch keine Optimierungspotenziale identifiziert werden. Möglich sind ggf. Emissionen infolge von Bränden.

Informationen zur Umweltbelastung bei der Entsorgung liegen nicht vor. Das in Elektronikprodukten enthaltene Gallium sollte über die getrennte Sammlung von Elektro- und Elektronikschrott erfasst werden. Es ist jedoch davon auszugehen, dass relevante Mengen weiterhin in den Restmüll gelangen. Aufgrund der geringen Mengenströme wird die Umweltgefährdung durch Gallium als gering erachtet.

Materialverluste

Große Materialverluste treten vor allem auf

- bei der Herstellung der Wafer aus Galliumarsenid und
- bei der Entsorgung von galliumhaltigen Produkten.

Recyclingpotenziale für Gallium und Galliumverbindungen gibt es vor allem bei der Herstellung von Wafern. Die anfallenden Produktionsabfälle und Schlämme können einem Recycling zugeführt werden. Es ist davon auszugehen, dass dies bereits mindestens teilweise erfolgt. Das Verbesserungspotenzial lässt sich auf der Grundlage der vorhandenen Daten nicht quantifizieren.

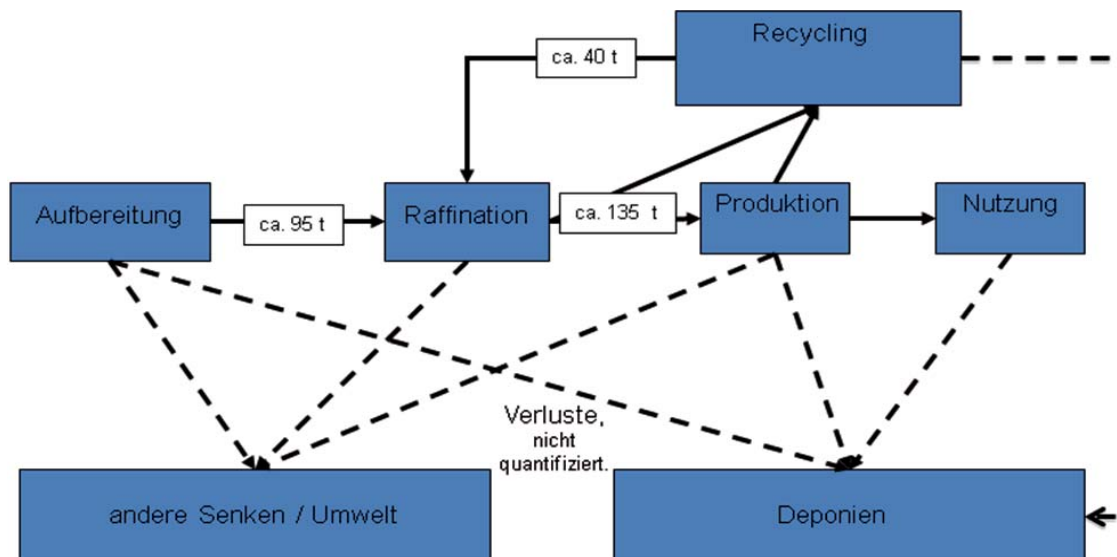
Am Ende der Nutzung wird Gallium in den meisten Anwendungen nicht recycelt. Das eingesetzte Gallium wird in der Regel verloren gehen. Angesichts der geringen Mengenströme an Gallium in Elektronikschrott dürfte es kaum ökonomisch sein, die Recyclingprozesse gezielt für Gallium zu optimieren. Ggfs. ergeben sich ökonomische Lösungen bei der kombinierten Rezyklierung verschiedener seltener Metalle aus Elektronikschrott.

Sollten Galliumverbindungen zukünftig verstärkt in der Photovoltaik eingesetzt werden, könnte das dort eingesetzte Gallium gezielt wieder gewonnen werden. Aufgrund der Kostensituation erscheint ein breiter Einsatz von Gallium in der Photovoltaik jedoch eher unwahrscheinlich.

Neben der Option eines verbesserten Recyclings besteht auch stets die Option, den Anfall von Reststoffen zu verringern. Bei der Waferherstellung scheint eine nahelie-

gende Möglichkeit zur Verringerung der Verluste darin zu bestehen, die Schnittbreite zu verringern. Allerdings ist eine solche Anpassung der Schnittbreite verfahrenstechnisch nicht einfach umzusetzen und ist seit jeher Gegenstand von Optimierungen in der Halbleitertechnik. Das genutzte Standard-Sägeverfahren „Innenlochsägen“ wurde bereits mit Blick auf möglichst geringe Verluste ausgewählt. Bei einer Verringerung der Schnittbreite durch den Einsatz dünnerer Sägeblätter verringert sich die Präzision des Schnitts und die Oberflächen müssen aufwendiger und mit höherem Materialverlust poliert werden. Insofern erscheint es wenig wahrscheinlich, den Materialverlust bei der Waferherstellung deutlich zu reduzieren. Erfolgversprechender erscheint es, auch bei Galliumarsenid – ähnlich wie bei Silizium – die Wafergrößen zu erhöhen und so den Randabfall zu reduzieren. Die Größe der Durchmesser von Galliumarsenid-Wafern ist im Vergleich jener zu Silizium-Wafern ausgesprochen gering.

Abb. I-6: Stoffhaushaltssystem Gallium mit jährlichen Flüssen. Bezugsraum: Welt; Bezugsjahr: 2007



I.3.2. Methodische Schwierigkeiten

Relevante Datenlücken

Die Herstellungsprozesse sind insgesamt nur sehr unzureichend dokumentiert. In der einschlägigen einsehbaren Fachliteratur sind weder Energieverbräuche noch quantitative Angaben zu den Emissionen vorhanden (Bautista 2003).

I.4. Referenzen

- Alfa Aesar - A Johnson Matthey Company (2008a): Sicherheitsdatenblatt Gallium arsenide, www.alfa-chemcat.com (08.02.2008)
- Alfa Aesar - A Johnson Matthey Company (2008b): Sicherheitsdatenblatt Gallium phosphide, www.alfa-chemcat.com (08.02.2008)
- Alfa Aesar - A Johnson Matthey Company (2009): Sicherheitsdatenblatt Gallium (III) nitride, www.alfa-chemcat.com (22.05.2009)
- Angerer, G. / Marscheider-Weidemann, F. / Lüllmann, A. / Erdmann, L. / Scharp, M. / Handke, V. / Marwede, M. (2009): Rohstoffe für Zukunftstechnologien. Schlussbericht vom 02.02.2009, Studie des Fraunhofer Instituts für System- und Innovationsforschung (ISI) und des Instituts für Zukunftsstudien und Technologiebewertung (IZT)
- Bautista, R. G. (2003): Processing to Obtain High-Purity Gallium, *Journal of Metals*, Vol. 3 (2003)
- Bretèque, P. de la (1980): Gallium and Gallium Compounds; in: Kirk-Othmer Encyclopedia of Chemical Technology (1980), 3. Auflage, Volume 11; New York, Chichester, Brisbane, Toronto
- Bringezu, S. (2000): Ressourcennutzung in Wirtschaftsräumen: Stoffstromanalysen für eine nachhaltige Entwicklung; Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag
- Classen, M. / Althaus, H.-J. / Blaser, S. / Tuchscheid, M. / Jungbluth, N. / Doka, G. / Faist Emmenegger, M. / Scharnhorst, W. (2009): Semiconductors: Tellurium, Gallium and Cadmium Compounds; in: Life Cycle Inventories of Metals. Final report ecoinvent data v2.1, Nr. 10. Empa Dübendorf, Swiss Centre for Life Cycle Inventories, Dübendorf, Switzerland; online version: www.ecoinvent.ch
- Greber, J. F. (1999): Gallium and Gallium Compounds; in: Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry (2009, electronic version)
- Herbell, J.-D. / Peil, S. (2001): Recycling von Gallium aus Problemabfallstoffen im Betrieb der III/V-Halbleitertechnologie, AIF-FV-Nr.: 12263, Institut für Energie- und Umwelttechnik e. V. (IUTA), Duisburg
- Jaskula, B. W. (2009a): Mineral Commodity Summaries 2009: Gallium. U. S. Geological Survey
- Jaskula, B. W. (2009b): Minerals Yearbook 2007: Gallium [Advanced release]. U. S. Geological Survey
- Katrak, F. E. / Agarwal, J. C. (1981): Gallium: Long-Run Supply, *Journal of Metals*, September 1981, 33-36

- Kerny, U. (1989): Nebenmetalle und ihre wirtschaftliche Bedeutung, *Metall*, Vol. 7 (1989)
- Lloyd, W. / Long, W. (1980): Possible Material Supply Constraints for Photovoltaic Solar Cells, *Mining Congress Journal*, Vol. 7 (1980)
- NRC [National Research Council] (2008): Minerals, Critical Minerals, and the U.S. Economy. National Research Council of the National Academies, Division on Earth and Life Studies, Board on Earth Sciences and Resources, Committee on Critical Mineral Impacts on the U. S. Economy and Committee on Earth Resources; Washington, D.C.: The National Academies Press
- USGS [U. S. Geological Survey] (2005): Gallium: End-Use Statistics
- Wardell, M. P. / Davidson, C. F. (1987): Acid Leaching Extraction of Ga and Ge, *Journal of Metals*, June 1987, 39-41

II. Gold

Martin Erren und Dominic Wittmer,
Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie

II.1. Einleitung

II.1.1. Relevanz

Gold ist aufgrund seiner aufwendigen Gewinnung und seiner begrenzten geologischen Verfügbarkeit von hoher Relevanz. Neben der traditionellen Verwendung für die Produktion von Schmuck und Anlagemünzen kommt Gold aufgrund seiner physikalischen und chemischen Eigenschaften verstärkt in der Elektronik zum Einsatz. Interessant ist hier insbesondere der Einsatz in schnelllebigen Konsumgütern wie z.B. Mobiltelefonen und Computern. Derartige Produkte werden häufig nach einer nur kurzen Nutzungsdauer durch neuere und technisch verbesserte Geräte ersetzt und sind, solange keine geeigneten Recyclingstrukturen vorhanden sind, potentiell dafür verantwortlich, dass ein großer Anteil des eingesetzten Materials verloren geht.

II.1.2. Charakteristika

Gold ist ein Edelmetall mit einem Schmelzpunkt von 1.064 °C, einem Siedepunkt von 2.208 °C und einer Dichte von 19,32 g/cm³. Es ist chemisch resistent sowohl gegenüber Säuren, als auch Laugen. Außerdem ist es gegenüber Luft, Wasser, Sauerstoff und Schwefel beständig. Gold ist löslich in Chlorwasser und Königswasser und kann ebenso mit Quecksilber in Form von Amalgam oder von Cyanidkomplexen gelöst werden. Gold hat eine hohe elektrische Leitfähigkeit und darüber hinaus eine große Dehnbarkeit (Renner et al. 2007).

In der Natur tritt Gold in Form von mikroskopisch kleinen Gold-Einschlüssen in Pyrit (FeS₂) oder Arsenopyrit (AsFeS) in sulfidischen Erzen auf.

Der TMR (Globaler Materialaufwand, engl.: *Total Material Requirement*) von Gold gehört mit 540.000 t/t Gold zu den höchsten von allen Metallen (Wuppertal Institut 2003),

für Seifenlagerstätten kann der TMR bis über 20.000.000 t/t Gold betragen (Valdivia 2005).

Die Toxizität von Gold und dessen löslichen Komponenten ist generell sehr gering. Eine Ausnahme bildet Tetrachloridogoldsäure ($\text{H[AuCl}_4\text{]}$), die starke Verätzungen der Haut bewirken kann (IFA 2009). Grundsätzlich gilt, dass Gold(III)-Salze eine höhere toxische Wirkung als Gold(I)-Verbindungen aufweisen. Gold(III)-Salze können Schädigungen an der Leber und Lunge hervorrufen. Eine Vergiftungsquelle ist das Kaliumdicyanoaurat(I) ($\text{K[Au(CN)}_2\text{]}$), welches Blausäure freisetzt. Bei entsprechend hoher Dosierung können auch andere Goldverbindungen toxisch wirken (Renner et al. 2007).

In der Medizin werden Goldverbindungen zur Behandlung von Rheuma und von Pemphigus vulgaris eingesetzt (eine Hauterkrankung, auf Deutsch auch: Blasensucht). In 30 % der Anwendungen kommt es aber zu unerwünschten Nebenwirkungen (Renner et al. 2007).

Allergische Reaktionen der Haut auf Goldschmuck und Zahngold sind bekannt, treten aber sehr selten auf und sind häufig auf unedlere Legierungselemente wie Nickel, Kobalt oder Kupfer zurückzuführen (Renner et al. 2007).

II.1.3. Anwendungsbereiche

Gold wird aufgrund seiner Eigenschaften in einer Vielzahl an Produkten eingesetzt. Quantitativ betrachtet ist der Schmucksektor der bedeutendste Bereich. Tab. II-1 gibt einen Überblick über die weltweite Goldnachfrage der verschiedenen Branchen.

Tab. II-1: Weltweite Goldnachfrage nach Branchen für den Zeitraum 2004-2008. Verteilung absolut und relativ (in Prozent, kursiv)

Weltweite Goldnachfrage	2004		2005		2006		2007		2008	
Schmuckfertigung	2.878	66,54	2.996	69,50	2.276	58,11	2.227	57,34	1.958	52,68
Anlagemünzen	109	2,52	108	2,51	113	2,88	129	3,32	206	5,54
Elektronik	332	7,68	357	8,28	372	9,50	403	10,38	422	11,35
Sonstige Endanwendungen	350	8,09	393	9,12	315	8,04	311	8,01	313	8,42
Fonds (börsengehandelt)	125	2,89	195	4,52	254	6,48	253	6,51	321	8,64
Einlagen von Zentralbanken	7	0,16	39	0,90	132	3,37	68	1,75	115	3,09
Dehedging *	524	12,12	223	5,17	455	11,62	493	12,69	382	10,28
Gesamtnachfrage	4.325	100,00	4.311	100,00	3.917	100,00	3.884	100,00	3.717	100,00

Quelle: Fortis (2009)

Im Zeitraum 2004-2008 ist die weltweite Nachfrage des Schmucksektors (Schmuckfertigung) nach Gold um mehr als 30 % gesunken (Fortis 2009)¹. In der Elektronikbranche und bei der Verwendung von Gold als Wertanlage ist dagegen ein positiver Trend zu verzeichnen: Die weltweite Nachfrage der Elektronikbranche nach Gold stieg im Zeitraum 2004-2008 um ca. 27 %. Aufgrund der steigenden Goldkurse ist auch die Nachfrage nach Gold als Wertanlage gestiegen. So werden mehr Anlagemünzen hergestellt und Gold wird z.B. physisch von Zentralbanken und Fondsgesellschaften eingelagert. Bei den „sonstigen Endanwendungen“ ist ein Nachfragerückgang um 11 % zu verzeichnen.

¹ Angaben des U. S. Geological Service sind ähnlich wie diejenigen von Fortis (2009). Letztere wurden hier aufgrund der differenzierteren Darstellung bevorzugt.

II.2. Umweltbelastungen und Materialverluste

II.2.1. Abbau

Gold tritt sowohl in primären Lagerstätten als auch in sekundären Lagerstätten² auf. Von den primären Lagerstätten sind die magmatischen Ganglagerstätten ein bedeutender Lagerstättentyp. Solche Ganglagerstätten besitzen Mächtigkeiten von 0,5-3 m und können eine bedeutende Ausdehnung von bis zu 250 km aufweisen, beispielsweise die Lagerstätte „Mother Lode“ in Kalifornien. Deren Gänge bestehen zu 97-98 % aus Quarz und enthalten daneben verschiedene Sulfide wie Pyrit oder Arsenopyrit (Okrusch / Matthes 2010). Das gediegene Gold liegt im Pyrit eingeschlossen vor und ist häufig mit Silber legiert. Bauwürdige Lagerstätten weisen üblicherweise einen Goldgehalt von 0,001-0,003 % auf, also 10-30 g Gold pro Tonne Erz. Bedeutende bauwürdige Lagerstätten befinden sich in den Vereinigten Staaten, Kanada, Australien, Indien und in den GUS-Staaten (Okrusch / Matthes 2010).

Durch Verwitterung, Transport und Ablagerung von Gesteinen entstehen sedimentäre Lagerstätten. Ein bedeutender Lagerstättentyp der sekundären Lagerstätten sind die Seifenlagerstätten: Gold reichert sich infolge seiner Verwitterungspersistenz in Form von kleinen, dünnen Blättchen an, nachdem es durch die Bewegung des Schotter ausgewalzt wurde. Nur selten werden erbsen- bis nussgroße gerundete Körner gefunden, die Nuggets genannt werden und in seltenen Einzelfällen 60-70 kg wiegen können³. Das Seifengold ist i. d. R. ärmer an Silber als Berggold aus primären Lagerstätten, da Silber bevorzugt in Lösung geht und Gold somit relativ angereichert wird. Goldseifen findet man in fast allen magmatischen Goldbezirken, vor allem in Kalifornien, Alaska, Nordkanada und in den GUS-Staaten⁴. Zu den fossilen Seifen zählt das Witwatersrandbecken. Dieses Becken ist die bedeutendste Goldlagerstätte.

Die Gewinnung von Gold erfolgt sowohl im Über- als auch im Untertagebau. Es liegt meist gediegen vor, fast immer mit Silber legiert. Daneben wird Gold aus goldführenden Mineralien gewonnen wie z.B. Sylvanit und Calaverit. Während der Gewinnung kommt es zu Goldverlusten, die regional unterschiedlich hoch sind (Tab. II-3) (Classen et al. 2009).

² In beiden Fällen handelt es sich um geologische Lagerstätten zur Erzgewinnung (also um Primärmaterial im Gegensatz zu Sekundärmaterial aus Recycling). Sekundäre Lagerstätten entstehen durch Verwitterung von Gesteinen und primären Goldlagerstätten. Infolge von Erosion werden Goldpartikel abgelagert und es entstehen sogenannte Goldseifen.

³ Der größte je gefundene Nugget („Welcome Stranger“) wog 72 kg und wurde im Jahre 1869 von John Deason und Richard Oates entdeckt.

⁴ GUS-Staaten: Gemeinschaft Unabhängiger Staaten

Tab. II-2: Ausbeute bei der Goldgewinnung: Verhältnis gewonnenes Gold zu Gesamtgoldgehalt im Erz

	Ausbeute
Schweden	90 %
Papua Neuguinea	90 %
Chile	85 %
Peru	85 %
Kanada	85 %
Vereinigte Staaten	88 %
Südafrika	97 %
Australien	92 %
Tansania	92 %

Quelle: Classen et al. (2009)

Bei der Goldgewinnung beträgt der Durchschnitt der weltweiten Goldausbeute 90 %, der Materialverlust entsprechend 10 % (Classen et al. 2009). Gold wird nicht nur aus Golderzen, sondern auch als Kuppelprodukt bei der Raffination der Metalle Kupfer, Blei und Nickel oder der Edelmetalle gewonnen. Es wird hier angenommen, dass diese Angaben auch für das in Kuppelproduktion (vgl. Kap. 0) gewonnene Gold gültig ist. Bezogen auf die weltweite Goldgewinnung im Jahr 2008 in Höhe von 2.325 t Gold erhält man einen Goldverlust von ca. 230 t, der mit dem Abraum in die Umwelt oder in die Deponien gelangt.

Umweltbelastungen im Zusammenhang mit der Gewinnung von Gold sind für einzelne Lagerstätten und Gewinnungsverfahren im Ecoinvent-Bericht beschrieben (Classen et al. 2009). Sie variieren in Abhängigkeit der Erze und Abbaubedingungen erheblich. Letztere weisen erwiesenermaßen eine große Variationsbreite auf (Valdivia 2005). Es ergeben sich erztypische Umweltbelastungen beim Abbau, wozu vor allem Schwermetallemissionen in Abwässer zählen (Tab. II-4). Im Rahmen der Gewinnung des Goldes kommt es im Allgemeinen zu erheblichen Landschaftsveränderungen durch die tiefgründige Flächeninanspruchnahme. Aufgrund der Bauwürdigkeit von Erzen mit geringer Goldkonzentration erfordern die großen Mengen abgebauten Erzes häufig die Anlagen von ausgedehnten Halden, sowohl im Tagebau, als auch im Untertagebau (siehe Beschreibung TMR in Kap. II.1.2).

Tab. II-3: Umweltbelastung und jährliche Materialverluste bei der Gewinnung von Gold

Erztyp, spezifiziert durch Hauptminerale	Umweltbelastung	Materialverluste	Bemerkungen
Gediegenes Gold	Landschaftsveränderung durch Flächeninanspruchnahme Emissionen von Schwermetallen in Wasser Sprenggase	230 t	Summe der Goldverluste aller Erztypen, 2008: ca. 10%
Sylvanit, Calaverit	Landschaftsveränderung durch Flächeninanspruchnahme Sprenggase		

II.2.2. Aufbereitung

Gold wird über den Abbau von goldhaltigen Erzen im Unter- bzw. Tagebau, einschließlich des Waschens von Seifengold, gewonnen. Es wird heute häufig in Kleinstmengen gewonnen und unter Zuhilfenahme mechanischer Hilfsmittel (Waschen, Mahlen und Amalgamation) vor Ort zu Rohgold verarbeitet. Mithilfe der Cyanidlaugerei wird anschließend Feingold gewonnen. Für Gold aus dem Untertageabbau ist eine mechanische Vorbehandlung noch vor der Cyanidlaugerei erforderlich. Im Anschluss an die Cyanidlaugerei folgen weitere Schritte wie der Carbon-In-Pulp-Prozess oder die Zink-Zementation (Renner et al. 2007).

Ein Teil des Goldes wird unter technisch einfachen Bedingungen gewonnen (Kleinbergbau). Obwohl die im Kleinbergbau geförderten Mengen nur von untergeordneter Bedeutung sind, sind diese durch den Einsatz von Quecksilber überproportional für Verschmutzungen verantwortlich.

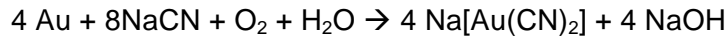
Amalgammethode

Erfolgt die Gewinnung von Rohgold aus Golderzen durch das Verfahren der Amalgamation, so wird das entsprechende Rohgold anschließend mit Hilfe des Wohlwill- oder Miller-Verfahrens zu Feingold aufbereitet.

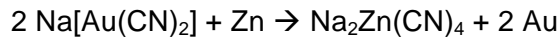
Die Amalgammethode (Amalgamation) nutzt die Eigenschaft, dass Gold mit Quecksilber eine Verbindung eingeht und so von der Gangart und anderen Metallen getrennt werden kann. Bei der Gewinnung und Verarbeitung von Gold wird durch die Amalgamation Quecksilberdampf freigesetzt, der erhebliche gesundheitliche Folgeschäden hervorrufen kann (Maydl 2004). Insbesondere bei der Goldgewinnung und Verarbeitung von Kleinstmengen kommt es im Zusammenhang mit schlechter technischer Ausstattung zu einer erheblichen Quecksilberexposition (Maydl 2004).

Cyanidlaugerei

Bei der Cyanidlaugerei wird Gold mittels Natriumcyanid in einen chemischen Komplex überführt. Die chemische Formel dazu lautet:



Danach werden die gebildeten Komplexe mit Zinkstaub zersetzt:



Als Alternative des zweiten Anwendungsschritts wird heute der unten beschriebene Carbon-In-Pulp-Prozess angewendet.

Bei der Cyanidlaugerei besteht die Gefahr der Freisetzung von Cyaniden und damit erheblichen Umweltbelastungen. Bekanntheit erlangte der Unglücksfall eines Dammbruchs bei einem Absetz- und Abwasserbecken einer Golderz-Aufbereitungsanlage bei Baia Mare, Rumänien, wo es im Jahr 2000 zu einem Dammbruch kam, indessen Folge etwa 100 t Cyanide in die Theiß und Donau gelangten und in der Theiß zu einer weitgehenden Zerstörung der Hydrobiologie und des Fischbestandes führten (Wachter 2003, Spiegel Online 2000).

Neben der Zink-Zementation ist der Carbon-In-Pulp-Prozess ein Verfahren, das Gold aus der Cyanidlaugerei abzuscheiden. Beim Carbon-In-Pulp-Prozess wird das Gold an Aktivkohle adsorbiert. Um es anschließend von der Kohle zu trennen, wird eine Ätzlauge zugesetzt, die das Gold an sich bindet. Die Trennung des Goldes erfolgt schließlich über Elektrolyse: Die Veredlung des Goldes findet in Raffinerien statt, die das Gold von Silberresten und anderen Metallen trennen. Am Ende dieser Prozesse erhält man Gold mit einem Reinheitsgrad von 99,9 %.

Miller-Verfahren und Wohlwill-Verfahren

Ungefähr ein Drittel des heute produzierten Goldes durchläuft das Miller-Verfahren. Es handelt sich hierbei um ein weiteres Verfahren, Feingold zu produzieren. Es beruht darauf, dass Gold-Chlor-Verbindungen ab einer Temperatur von 400 °C unbeständig sind, dagegen Silber und andere Basismetalle bei Temperaturen um 1.100 °C feste Chlor-Verbindungen bilden. Ein weiteres Verfahren, Feingold zu gewinnen, ist die Wohlwill-Verfahren (Wohlwill-Elektrolyse). Die hierbei genutzte Elektrolytflüssigkeit besteht aus 2,5 mol/l Salzsäure und 2 mol/l Tetrachloridogoldsäure. Als Anode wird Rohgold eingebracht; in der Vergangenheit diente Feingold als Kathode, doch wird heute zunehmend Titan oder Tantal verwendet. Als Produkt erhält man Feingold mit einem Gehalt von 99,9 % (Renner et al. 2007).

Gewinnung als Kuppelprodukt aus Anodenschlamm

Aus dem Anodenschlamm beispielsweise der Silberelektrolyse wird mittels Affination (Miller-Verfahren) Feingold gewonnen. Alternativ kann das Verfahren der Wohlwill-Elektrolyse eingesetzt werden. Hieraus folgt, dass die Umweltbelastungen der vorge-

schalteten Prozesse anteilmäßig auch auf die Goldproduktion anzuwenden sind. Eine quantitative Aussage ist hier allerdings nicht möglich.

Tab. II-4: Umweltbelastung und jährliche Materialverluste bei der Aufbereitung von Gold

Aufbereitungsprozess	Umweltbelastung	Materialverluste	Bemerkungen
Amalgammethode	Quecksilberemissionen (Dämpfe)	unbekannt	
Cyanidlaugung	Emissionen von Cyaniden in aquatische Systeme sind möglich	unbekannt	
Carbon-Pulp-Prozess	Emission von Laugen möglich	unbekannt	
Miller-Verfahren	Emission von Säuren möglich	unbekannt	
alle Aufbereitungsprozesse	Schwermetallstäube wie z.B. Cadmium und Wismuth, SO ₂ - und SO ₃ -Emissionen, Säurenebel aus HCl, Salpetersäure, NO _x und organischen Verbindungen wie VOC oder PCDD/F	unbekannt	

II.2.3. Verarbeitung

Aus Gold werden goldene bzw. goldhaltige Vorprodukte wie z.B. Golddrähte gefertigt. Zur Herstellung von Halbzeug und Legierungen konnten keine Angaben zu Materialverlusten ermittelt werden.

Gold wird häufig zu Legierungen verarbeitet. Folgende Legierungen werden u. a. hergestellt:

- Titangold (99 % Gold, 1 % Titan)
- Farbgold (Legierung aus Gold, Silber und Kupfer)
 - Gelbgold
 - Rotgold
 - Blassgold
- Weiß- und Graugold (Gold in Verbindung mit Platin, Palladium und/oder Silber)
- Grüngold (überwiegend Silber mit einem geringen Gold- und Cadmiumanteil)

Es ist davon auszugehen, dass anfallender Schrott wiederverwendet wird unmittelbar nachdem er anfällt, und dass die Materialverluste aufgrund des hohen Wertes des

Goldes vernachlässigbar gering seien. Die vorliegende Literatur lässt keine Aussagen zu Umweltbelastungen zu.

Tab. II-5: Umweltbelastung und jährliche Materialverluste bei der Verarbeitung von Gold

Vorprodukt	Umweltbelastung	Materialverluste	Bemerkungen
Halbzeug	unbekannt	unbekannt, vermutlich vernachlässigbar gering.	
Legierungen	unbekannt	unbekannt, vermutlich vernachlässigbar gering.	

II.2.4. Produktion goldhaltiger Produkte

Weltweit wurden im Jahr 2008 3.871 t Gold in der Produktion eingesetzt gegenüber ca. 4.049 t in 2004 (Fortis 2009). Tab. II-6 zeigt die weltweite Goldproduktion. In der Literatur sind keine Angaben über relevante Materialverluste aufgeführt, ebenso keine Angaben über relevante Umweltauswirkungen der Produktion von Goldprodukten bzw. goldführenden Produkten.

Tab. II-6: Weltweite Goldproduktion im Zeitraum 2004-2008. Angabe in Tonnen

	2004	2005	2006	2007	2008
Minenproduktion	2.409	2.477	2.425	2.398	2.356
Recycling	1.108	882	1.123	1.056	1.185
Gesamt⁵	4.049	4.058	3.971	4.130	3.871

Quelle: Fortis (2009)

Schmuck

Weltweit wurden im Jahr 2008 ca. 2.000 t Gold zu Schmuck verarbeitet, davon nur ca. 17 t in Deutschland. Tab. I-8 zeigt die Produktionsmengen von Goldschmuck für die Welt und für Deutschland im Zeitraum 2004-2008.

Tab. II-7: Produktion von Goldschmuck bzw. goldhaltigem Schmuck. Angaben in Tonnen

	2004	2005	2006	2007	2008
Welt	2.878	2.996	2.276	2.227	1.958
Deutschland	23	23	21	20	17

Quelle: Fortis (2009)

⁵ Neben den hier genannten Positionen wird zudem Gold physisch in Zentralbanken eingelagert.

Bei der industriellen und handwerklichen Fertigung von Goldschmuck kommt es aufgrund des hohen Goldwertes nur zu sehr geringen Goldverlusten (Umicore et al. 2005, Hagelüken et al. 2005). Die unwiederbringlichen Goldverluste bei der industriellen Fertigung werden weltweit auf 2-10 % (durchschnittlich 5 %) des eingesetzten Materials geschätzt (Umicore et al. 2005, Hagelüken et al. 2005). Bei der handwerklichen Verarbeitung kommt es weltweit nach Schätzungen zu einem unwiederbringlichen Verlust von ca. 2 % (Umicore et al. 2005, Hagelüken et al. 2005). Es liegen jedoch keine Angaben vor, welcher Anteil der Produktion des Goldschmucks industriell oder handwerklich gefertigt wird. Unter der Annahme, dass ein Großteil des Schmucks industriell verarbeitet wird, ergibt sich für die weltweite Schmuckherstellung im Jahr 2008 ein unwiederbringlicher Verlust von ca. 100 t Gold (Umicore et al. 2005, Hagelüken et al. 2005).

Nach Einschätzung von Experten sind diese Verluste nicht weiter zu verringern, da die Produktionsprozesse hinsichtlich einer materialschonenden Verfahrensweise bereits optimiert sind (Umicore et al. 2005, Hagelüken et al. 2005).

Elektronik und Elektrotechnik

Im Jahr 2008 wurden weltweit ca. 400 t Gold von der Elektronikbranche nachgefragt, wovon ca. 50 t von europäischen Unternehmen verarbeitet wurden. Die Weltjahresproduktion an Computern und Mobiltelefonen beansprucht ca. 85 t Gold, was 2-3 % der weltweit verarbeiteten Goldmenge entspricht (Hagelüken 2009). Wie hoch die Materialverluste während dieses Prozesses sind ist unbekannt. Ebenfalls sind die Auswirkungen auf die Umwelt nicht zu benennen.

Münzprägung

Im Jahr 2008 sind ca. 200 t Gold zum Prägen von Anlagemünzen und Medaillen eingesetzt worden, davon 87 t Gold in Europa. Es liegen keine Angaben zu möglichen Materialverlusten bei der Herstellung von Münzen und Medaillen vor. Goldverluste sind hier nicht dokumentiert; sie werden als vernachlässigbar eingeschätzt.

Dentallegierung

In Deutschland werden jährlich ca. 22 t Gold für Dentallegierungen eingesetzt (Hagelüken et al. 2005).

Gold als Anlage

Gold wird an verschiedenen Stellen in der Finanzbranche und von Zentralbanken als Investitionsgut genutzt. Anleger erwerben Gold über diverse Finanzprodukte wie z.B. Investmentfonds, und auch Zentralbanken lagern Gold in verschiedenen Mengen sicher ein. Informationen zu Lagerzugängen und -abgängen reichen jedoch nicht aus, um diese Mengen zu quantifizieren. In dieser Anwendung entstehen keine Materialverluste und Umweltbelastungen.

Tab. II-8: Umweltbelastung und jährliche Materialverluste bei der Verarbeitung von Gold in der Produktion von goldhaltigen Produkten

Anwendungsbereich	Produkt	Umweltbelastung	Materialverluste	Bemerkungen
Schmuckfertigung	Schmuck	unbekannt	100 t/a	
Münzprägung	Anlagemünzen	unbekannt	unbekannt	
Elektrotechnik	Elektronik	unbekannt	unbekannt	
Sonstige Endanwendungen		unbekannt	unbekannt	

II.2.5. Nutzung

Gold in Münzen und Barren wird aufgrund seines hohen Wertes mit nur relativ geringen Verlusten recycelt⁶. Bei goldführenden Produkten treten jedoch unerwünschte Verluste auf, da das darin enthaltene Gold, beispielsweise im goldführenden Elektro- und Elektronikgeräte-Abfall (WEEE), nicht vollständig dem Recycling zugeführt wird. Es ist davon auszugehen, dass ein Großteil dieser Verluste durch den Eintrag der Elektrokleingeräte in den Hausmüll stattfindet. Im Folgenden wird dieser Eintrag getrennt nach Ländern abgeschätzt: Für das Jahr 2007 sind Gesamtverluste bezogen auf den Goldgehalt von 73 % für Deutschland und 75 % für die Vereinigten Staaten dokumentiert (Chancerel 2009). Diese hohen Verlustraten treten auf, obwohl zumindest die Sammelquote in Deutschland mit 77 % (Vereinigte Staaten: 30%) recht hoch ist. Für Deutschland lässt sich folgern, dass die Recyclingstrukturen begründen, dass eine Rückgewinnung nur sehr begrenzt erfolgt. Dies entspricht für Deutschland im Jahr 2007 einem Goldverlust von ca. 1,6 t, für die Vereinigten Staaten von ca. 2,8 t.

Durch Übertragen der hier veranschlagten Verlustrate von ca. 75 % (Deutschland: 73 % und Vereinigte Staaten 75 %) auf die Welt erhält man eine grobe Abschätzung für den globalen Goldhaushalt. Man erhält für das Jahr 2007 einen Verlust von ca. 316 t Gold, die innerhalb der Nutzungs- oder Recyclingsphase anfallen. Hiervon können ca. 95 - 244 t nach der Nutzungsphase und 72 - 221 t während des Recyclings entstehen. Dies hängt maßgeblich davon ab, inwiefern die Elektroaltgeräte (EAG) tatsächlich dem Recyclingstrukturen zugeführt werden.

Entscheidend hierbei ist die Zuordnung der Verluste. Nach Chancerel (2009) werden in Deutschland – bezogen auf EAG – ca. 77 % der goldführenden Produkte gesammelt, der Rest von ca. 23 % des Goldes geht nach der Nutzungsphase verloren. Vergleichsweise dazu ist die Sammelquote in den Vereinigten Staaten gering. Sie liegt bei ca. 30 % und somit ergibt sich eine Verlustrate nach der Nutzungsphase von ca. 70 % des dort eingesetzten Goldes. Die von Chancerel (2009) angegebenen Sammelquoten beziehen sich auf kleine elektrische und elektronische Altgeräte.

⁶ Gold wird häufig über private Sammelstellen dem Goldrecycling zugeführt.

Wie im Detail die Sammelquoten weitere Länder einzuschätzen sind, ist ungewiss. Es ist jedoch davon auszugehen, dass die in Deutschland erzielten Sammelquoten für viele Länder nicht zu erzielen sind und somit ein Großteil der Verluste in der Welt schon vor dem eigentlichen Recycling anfällt. Dennoch ist klar darauf hinzuweisen, dass das Einsammeln der EAG nicht zwangsläufig zu einem guten Ergebnis führen muss. Deutschland ist hierfür ein Beispiel und es zeigt, dass auch innerhalb der Recyclingstrukturen selbst weitere Potentiale generiert werden müssen.

Tab. II-9 fasst die Ergebnisse von Chancerel (2009) zusammen.

Tab. II-9: Übersicht zu Gold- und Palladiumverlusten von Elektroaltgeräten in Deutschland und den Vereinigten Staaten (USA) für das Jahr 2007. Positionsbezeichnungen teils Englisch (kursiv)

Land	Geräte- kategorie	Sammel- rate	Wieder- verwen- dungs- rate	Treatment rate		Recovery rate		Discarding rate	
				Formal	Informal	Au	Pd	Au	Pd
Deutsch- land	<i>Mobile telephone</i>	18%	5%	12%	1%	7%	7%	88%	88%
	<i>Desktop PC</i>	76%	7%	62%	7%	37%	36%	56%	57%
	<i>CRT monitor</i>	99%	3%	76%	20%	47%	44%	51%	53%
	<i>Large high- grade eq.</i>	92%	4%	81%	7%	33%	32%	64%	65%
	<i>Small high- grade eq.</i>	54%	1%	49%	3%	20%	19%	79%	80%
	<i>Low grade eq.</i>	60%	3%	52%	5%	15%	15%	82%	83%
	<i>All groups</i>	77%	3%	64%	10%	24%	23%	72%	73%
USA	<i>Mobile telephone</i>	11%	4%	5%	1%	4%	4%	92%	92%
	<i>Desktop PC</i>	54%	15%	30%	7%	24%	23%	61%	62%
	<i>CRT monitor</i>	40%	6%	14%	20%	11%	8%	83%	86%
	<i>Large high- grade eq.</i>	59%	17%	32%	8%	17%	16%	66%	67%
	<i>Small high- grade eq.</i>	22%	0%	17%	4%	9%	8%	91%	91%
	<i>Low grade eq.</i>	1%	0%	0%	0%	0%	0%	100 %	100 %
	<i>All groups</i>	30%	6%	13%	10%	15%	14%	75%	75%

Quelle: Chancerel (2009)

Tab. II-10 liefert eine Übersicht über die Sammelquoten verschiedener WEEE Produktkategorien in der EU-27 für das Jahr 2005. Hinsichtlich Goldfrachten sind in Tab. II-10 die Fraktionen 3A, 3B, 4A, 4B und 4C relevant.

Tab. II-10: Sammelquoten von WEEE-Kategorien in der EU27 im Jahr 2005 (Originalbezeichnungen auf Englisch)

#	Treatment category	Current % collected of WEEE arising
IA	Large household Appliances	16,3%
IB	Cooling and freezing	27,3%
IC	Large household Appliances (small items)	40,0%
2,5A,8	Small household appliances, lighting equipment. – Luminaires and 'domestic' medical devices	26,6%
3A	IT and telecom excl. CRT	27,8%
3B	CRT monitors	35,3%
3C	LCD monitors	40,5%
4A	Consumer Electronic excl. CRT	40,1%
4B	CRT TV	29,9%
4C	Flat panel TV	40,5%
5B	Lighting equipment – lamps	27,9%
6	Electrical and electronic tools	20,8%
7	Toys, leisure and sports equipment	24,3%
8	Medical devices	49,7%
9	Monitoring and control instruments	65,2%
10	Automatic dispensers	59,4%

Quelle: Huisman et al. (2007)

Es ist festzustellen, dass zurzeit in den meisten Gerätekategorien die Sammelquote unter 50 % liegt. Nach Huisman et al. (2007) ist zu erwarten, dass langfristig ca. 75 % der Elektrogroßgeräte und ca. 60 % der mittelgroßen Geräte eingesammelt werden können.

Während der Nutzung treten keine Umweltbelastungen durch das eingesetzte Gold auf.

Tab. II-11: Umweltbelastung und jährliche Materialverluste der Nutzungsphase von Gold

Anwendungsbereich	Umweltbelastung	Materialverluste
Elektronik und Elektrotechnik	keine	95-244 t

II.2.6. Recycling

Sekundäres Gold kann durch Wiedergewinnung aus Goldlegierungen, goldführenden Produktionsabfällen und vergoldeten Materialien gewonnen werden.

Schmuck

Aufgrund seines hohen Wertes wird Altschmuck zumeist zur Verwertung bei Goldhändlern abgegeben und gelangt nicht in den Siedlungsabfall. Eine Besonderheit bei der Nutzung als Schmuck ist, dass der größte Teil des Schmuckgoldes für längere Zeit im Bestand verbleibt (Lager) und nur ein relativ kleiner Anteil in Form von Altschmuck rezykliert wird; der Anteil des in Form von Schmuck rezyklierten Goldes beträgt ca. 10 % gegenüber dem Gold, das in der Schmuckfertigung verarbeitet wird. So deckt das Recycling aus Goldschmuck (rechnerisch) nur einen kleinen Teil ab, da das Lager sich in einem starken Wachstum befindet und zudem eine durchschnittliche Nutzungsdauer von mehreren Jahren aufweist (Umicore et al. 2005, Hagelüken et al. 2005). Im Jahr 2002 gelangten in Deutschland 30-40 t in die Nutzung, während ca. 3,6 t Gold aus Altschmuck in den Produktionsprozess zurückgeführt wurden (Umicore et al. 2005, Hagelüken et al. 2005), was einem Verhältnis von Altschmuck/Neuschmuck von ca. 10 % entspricht. Es wird angenommen, dass sich dieser Wert bis heute nicht wesentlich verändert hat. Durch Hochrechnung des Altschmucks in Deutschland auf die Welt mithilfe der Neuschmuck-Mengen erhält man als weltweiten Input von Gold in den Recyclingkreislauf ca. 200 t/a gegenüber einem Lagerzuwachs von ca. 1.800 t.

Elektronik und Elektrotechnik

Im Bereich Elektronik und Elektrotechnik kommt es im Rahmen des Recyclings zu erheblichen Goldverlusten. Eine weltweite Quantifizierung ist auf Grundlage der ausgewerteten Literatur allerdings nicht möglich. Für Deutschland und die Vereinigten Staaten lassen sich Angaben zur Produktgruppe der Kleingeräte machen. In Deutschland beträgt der Verlust im Jahr 2007 ca. 1,4-1,7 t, in den Vereinigten Staaten ca. 2,3-3,2 t (Chancerel 2010). Insbesondere der Einsatz von Gold in Massenprodukten wie Mobiltelefonen und Computern bewirkt, dass jeweils kleinstmengen in den Hausmüll gelangen oder im Rahmen der Abfallbehandlung exportiert werden. Inwieweit die exportierten Güter recycelt werden oder in die Deponien gelangen, ist nicht bekannt. Zwar werden in Schwellenländern vereinzelt Recyclingstrukturen geschaffen (z.B. Sander / Schilling 2010), jedoch ist auf dieser Basis eine Quantifizierung oder gar Hochrechnung auf andere Teile der Welt innerhalb dieser Arbeit nicht möglich; aktuell wird eine entsprechende Studie auf europäischer Ebene durch die Europäische Umweltagentur durchgeführt. Wenn der Elektroschrott darüberhinaus unsachgemäß recycelt wird, kann dies zusätzlich zu erheblichen Umweltbelastungen und Gesundheitsgefahren führen.

Selbst dann, wenn ausgediente Elektro- und Elektronikprodukte, welche Gold enthalten, dem inländischen bzw. europäischen Sammelsystem für Elektroaltgeräte zuge-

führt werden, ist nicht sichergestellt, dass Gold und andere Edelmetalle in großem Umfang zurückgewonnen werden: Nach Sammlung der Geräte treten Verluste auf beim Zerlegen und Sortieren (ca. 10 %), bei der Aufbereitung (ca. 20 %) und beim Refining (ca. 5 %) (Hagelüken 2005). Derartige Annahmen werden durch weitere Untersuchungen für Deutschland und die Vereinigten Staaten unterstützt (Chancerel 2009).

Kap. II.2.5 verdeutlicht die Verlustmengen, welche in Abhängigkeit der Sammelquote der Nutzungsphase oder dem Recycling zugeordnet werden⁷. Während des Recyclings treten in der Regel Materialverluste auf, die sich auf eine Gesamtmenge von jährlich 72-221 t/a beläuft (siehe Kap. II.2.5). Die große Bandbreite der Materialverluste (Faktor 3) ergibt sich aus der Unsicherheit der Sammelquote (ergibt sich aus dem Komplementäranteil zu Goldfrachten im Restmüll, vgl. Kap. II.2.5) und den Verlusten während des Recyclings der gesammelten goldführenden Abfälle von Elektroaltgeräten.

Sonstige

In Deutschland werden jährlich ca. 22 t Gold für Dentallegierungen eingesetzt. Unter der Annahme, dass ca. 50 % dieses Goldes für Neuversorgungen verwendet werden (Hagelüken et al. 2005), könnten jedes Jahr ca. 11 t Altzahngold ersetzt (Austausch beim Patienten) und dem Recyclingkreislauf zugeführt werden. Da aber der Wert der Dentallegierungen häufig als zu gering eingeschätzt wird, wird von einem Verlust von 50 % der potentiell dem Recycling zur Verfügung stehenden Menge ausgegangen (Hagelüken et al. 2005), was einem jährlichen Verlust von 5,5 t Gold entspricht. Ob diese Altlegierungen tatsächlich nicht mehr dem Recyclingkreislauf zur Verfügung stehen oder ob sie möglicherweise zu einem späteren Zeitpunkt recycelt werden, ist unklar. Für eine weltweite Betrachtung liegen keine ausreichenden Daten vor.

Recyclingverfahren

Bei Goldlegierungen mit einem Goldanteil größer 30 % wird das Miller-Verfahren zur Rückgewinnung des Goldes angewendet (Renner et al. 2007). Legierungen mit einem geringeren Goldanteil werden in heißem Königswasser oder in Salzsäure aufgelöst. Aus dieser Lösung wird verhältnismäßig reines Gold durch die selektive Reduktion zurückgewonnen. Bei Anwesenheit von Kupfer- und Bleiionen sind die üblicherweise eingesetzten Reduktionsmittel Schwefeldioxid oder Hydrazin, bei Platingruppenmetallen fällt die Wahl auf Oxalsäure. Gold-Kupfer-Legierungen werden verdünnter Salzsäure ausgesetzt. Dadurch werden die Edelmetalle und die Basismetalle voneinander getrennt. Für Gold-Silber- bzw. Gold-Kupfer-Silber Legierungen sind zwei weitere Verfahren zu nennen: Silber kann entweder mit Hilfe von Salpetersäure oder heißer konzentrierter Salzsäure gelöst werden.

⁷ Das bedeutet: Je niedriger die Sammelquote, desto höher der Verlust, der der Nutzungsphase zugeordnet wird.

Während der Verarbeitung von Gold fallen Abfälle, Staub und Rückstände an. Diese werden ebenfalls aufgearbeitet und dem Recycling zugeführt. Der Goldgehalt dieser Fraktionen liegt in der Regel zwischen 0,5 % und 10 % (Renner et al. 2007). Sie werden in der Regel vorbehandelt: Sie werden fein gemahlen, gesiebt und wenn nötig getrocknet oder gebrannt. Anschließend wird das goldhaltige Material zusammen mit silberhaltigem Material in einem Blei-Schachtofen eingeschmolzen. Abhängig von der Zusammensetzung der einzuschmelzenden Materialien werden dem Schmelzprozess Kalziumkarbonat, Kieselsäure, Bleioxid und schwefelhaltige Stoffe hinzugefügt (Renner et al. 2007). Die hieraus entstehende metallische Phase enthält Blei und Edelmetalle. Diese Legierung wird weiter zu Doré-Silber verarbeitet (geringer Anteil Gold, kleiner 0,1 % Blei und Silber). Doré-Silber wird dann in einem weiteren Verfahrensschritt getrennt in reines Silber und Gold.

Ebenfalls wird Gold aus vergoldeten Materialien zurückgewonnen. Diese Materialien stammen meist aus der Elektronikbranche, geringe Mengen fallen auch bei Schmuck an. Der wesentliche Bestandteil dieser Materialien ist ein Nichtedelmetall, auf dem eine dünne Goldschicht aufgetragen ist. Insgesamt ist der Goldanteil i. d. R. nur einige zehntel Prozent bis hin zu wenigen Prozenten groß. Die beste Lösung ist es, die metallische Basis von der Goldschicht zu trennen. Eine mechanische Vorbehandlung ist oft nötig, um die Goldoberfläche freizusetzen und eventuell vorhandene Kunststoffe durch Pyrolyse abzutrennen. Das Basismaterial wird dem Recycling zugeführt. Um aus der metallischen Phase das Gold zu extrahieren, wird diese in eine basische Cyanidlösung gegeben. Daran anschließend wird der Lösung Zinkpulver hinzugefügt, um das Gold zurückzugewinnen. Dies kann ebenfalls mithilfe der Elektrolyse geschehen.

Im Jahr 2008 sind weltweit ca. 1.200 t der nachgefragten Menge Gold über das Recycling zurück in die Aufbereitung oder Verarbeitung gelangt (siehe Tab. II-7). Verfahrenstechnisch sind ca. 5 % Verlust während des eigentlichen Recyclingprozesses (Raffination) zu erwarten (Umicore et al. 2005, Hagelüken et al. 2005), was bezogen auf die globale Produktion ca. 63 t Gold Verlust bedeutet. In Deutschland wurden im Jahr 2008 6,1 t Gold aus Recyclingprozessen gewonnen (Fortis 2009). Die Hochrechnung ergibt damit für Deutschland rechnerisch einen Verlust von 320 kg Gold. Diese Berechnungen basieren auf der Annahme, dass bei Recyclingprozessen die jeweils aktuellste Technologie zur Verfügung steht. Europa- und weltweit ist jedoch nicht davon auszugehen (Salhofer et al. 2009). Ein wichtiger Schritt, die Recyclingquote von seltenen Metallen zu verbessern, ist eine vorgeschaltete Sichtung mit manueller Sortierung der Schrotte. Edelmetallreiche Komponenten sollen dabei im Vorhinein erkannt werden, um vermeidbare mechanische Bearbeitungsstufen zu unterbinden, bei denen es zu relevanten Materialverlusten kommt (Chancerel et al. 2009).

Tab. II-12: Umweltbelastung und jährliche Materialverluste beim Recycling von Gold

Anwendungsbereich	Umweltbelastung	Materialverluste	Bemerkungen
Schmuck	Keine relevanten Belastungen	Keine relevanten Verluste	
Elektronik und Elektrotechnik	Div. Emissionen, je nach Technologie	72-221 t/a	
Dentalmedizin		< 6 t/a	Betrachtung begrenzt auf Deutschland
Recycling von Produkten diverser Anwendungsbereiche	vgl. Herstellung	> 63 t/a	Stand der Technik in Deutschland

II.2.7. Gold in die Deponien

Gold gelangt in Form von Abraum und während der Nutzung über Elektronikgeräte in die Deponien. Dort liegt es inert vor und verursacht nur bedingt Umweltbelastungen. Gold kann unter bestimmten mikrobiologischen Voraussetzungen in Lösung gehen. Angereichert in Pflanzen kann das zu physischen und biochemischen Veränderungen führen (Alloway 1999). Untersuchungen, inwiefern Deponien dafür verantwortlich sind, dass Gold in den Boden gelangt, liegen nicht vor.

Während der Gewinnung wird ein Teil des Goldes als Abraum deponiert (Kap. II.2.1). Die darin enthaltene Goldfracht beträgt 230 t Gold.

Weiterhin fallen ca. 316 t/a Goldverluste bei EAG an. Diese Verluste treten sowohl nach der Nutzungsphase als auch während des Recyclings auf.

Tab. II-13: Umweltbelastung und jährliche Materialverluste durch Eintrag von Gold in Deponien

Fraktion/Deponietyp	Umweltbelastung	Materialverluste	Bemerkungen
Elektroaltgeräte	nicht durch Gold	316 t/a	teils nach der Nutzungsphase, teils während des Recyclings (siehe Erläuterungen im Text).
Schmuck		100 t/a	
Goldführende Rückstände	unbekannt	< 230 t/a	

II.2.8. Gold in die Umwelt und andere Senken

Neben den Goldverlusten bei der Gewinnung konnten keine weiteren Goldverluste in die Umwelt und andere Senken bestimmt werden. Sollte darüber hinaus Gold in die Umwelt gelangen, so sind dort keine relevanten Umweltbelastungen zu erwarten. Theoretisch ist zwar eine Mobilisierung von Gold möglich, was zu einer erhöhten Konzentration und damit zu physischen und biochemischen Veränderungen bei Pflanzen führen kann, doch aufgrund der kleinen Menge Gold sollten die Auswirkungen sehr gering sein.

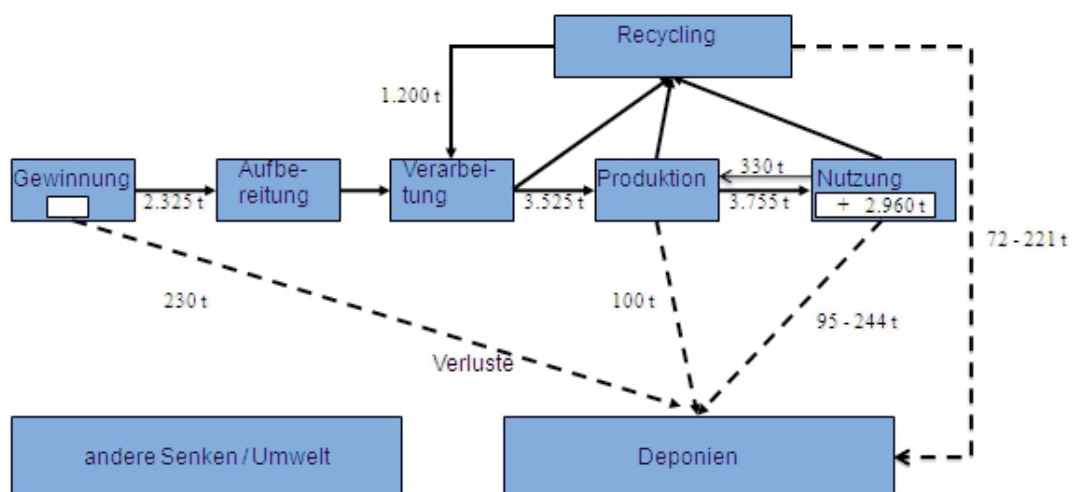
II.3. Fazit

II.3.1. Verbesserungspotential

Die relevanten Umweltbelastungen des Stoffhaushalts von Gold treten beider Gewinnung auf. Beim Erzabbau dominiert die Flächeninanspruchnahme, verbunden mit einer Zerstörung der Landschaft; dies spiegelt sich im TMR wider, der mit ca. 540.000 t/t Gold zu den höchsten gehört (Wuppertal Institut 2003). Es ist denkbar, dass künftig vorrangig Minen erschlossen werden, die mit einem möglichst geringen ökologischen Rucksack der Abgrabung verbunden sind. Desweiteren kommt es bei der Gewinnung zu Emissionen von Schwermetallen, insbesondere Quecksilber, auch kann es zur Freisetzung von Cyaniden kommen. Verbesserungspotenzial besteht vor allem in der weltweiten Verbreitung der besten verfügbaren Technik (BAT), um die Emissionen zu reduzieren.

Relevante Materialverluste treten nach der Nutzung bzw. im Rahmen des Recyclings auf. Insbesondere bei Produkten der Elektronik und Elektrotechnik. Hier bestehen Probleme bei der Überführung der Altgeräte zum Recycling und bei der Wiedergewinnung der Wertstoffe. Eine Effizienzsteigerung innerhalb der Recyclingkette ist daher anzustreben. Hier gilt es, vor allem die Sammlung und Aufbereitung der Altgeräte zu verbessern und ein hochwertiges Recycling sicherzustellen. Das Produktdesign der Gold enthaltenden Produkte sollte wiederum auf die Möglichkeiten und Grenzen der EAG Verwertung abgestimmt werden.

Abb. II-1: Stoffhaushaltssystem Gold mit jährlichen Flüssen. Bezugsraum: Welt



II.3.2. Methodische Schwierigkeiten

Relevante Datenlücken

Insbesondere in den Anwendungsbereichen Elektronik und Elektrotechnik ist es problematisch herauszuarbeiten, inwiefern die Produkte z.B. über den Hausmüll entsorgt und somit den jeweiligen regionalen Mülldeponien zugeführt werden (oder über diverse Exportkanäle in anderen Länder transportiert und dort weiterverwendet, eventuell später recycelt oder anderweitig entsorgt werden).

II.4. Referenzen

- Alloway, B. J. (1999): Schwermetalle in Böden – Analytik, Konzentration, Wechselwirkungen; Berlin, Heidelberg, New York, Barcelona, Honkong, London, Mailand, Paris, Singapur, Tokio: Springer-Verlag
- Chancerel, P. / Meskers, C. E. M. / Hagelüken, C. / Rotter, V. S. (2009): Assessment of Precious Metal Flows During Preprocessing of Waste Electrical and Electronic Equipment; *Journal of Industrial Ecology*, Vol. 13, Nr. 5
- Chancerel, P. (2010): Substance flow analysis of the recycling of small waste electrical and electronic equipment – An assessment of the recovery of gold and palladium. Dissertation. ITU-Schriftreihe, Institut für Technischen Umweltschutz, Technische Universität Berlin, Berlin
- Classen M. / Althaus H.-J. / Blaser S. / Tuchschnid M. / Jungbluth N. / Doka G. / Faist-Emmenegger M. / Scharnhorst W. (2009): Life Cycle Inventories of Metals. Final report. Ecoinvent data v2.1, Nr. 10. Empa, Swiss Centre for Life Cycle Inventories; Dübendorf, Switzerland. Online version: www.ecoinvent.ch
- Fortis Bank (2009): The Yellow Book 2009
- Hagelüken, C. / Buchert, M. / Stahl, H. (2005): Stoffströme der Platingruppenmetalle – Systemanalyse und Maßnahmen für eine nachhaltige Optimierung der Stoffströme der Platingruppenmetalle. GDMB-Fachausschuss Sondermetalle
- Hagelüken, C. (2008): Recycling ausgewählter NE-Metalle aus offenen Systemen – rohstoffwirtschaftliche und umweltpolitische Implikationen. Vortrag Zukunftsdialog Rohstoffproduktivität und Ressourcenschonung; Berlin (24.01.2008)
- Hagelüken, C. (2009): „Urban Mining“ ist wichtiger Beitrag zum Klimaschutz; in: *Dow Jones Trade News Emissions*, Vol. 5
- Huisman, J. / Magalini, F. / Kuehr, R. / Maurer, C. / Delgado, C. / Artim, E. / Stevels, A. L. N. (2007): Review of directive 2002/96 on waste electrical and electronic equipment (WEEE). United Nations University; Bonn
- IFA [Institut für Arbeitsschutz der Deutschen Gesetzlichen Unfallversicherung] (2009): GESTIS-Stoffdatenbank: Gold; www.dguv.de/ifa/stoffdatenbank (16.01.2010)
- Maydl, S. (2004): Goldgewinnung als Ursache von chronischen Quecksilbervergiftungen in Mount Diwata, Mindanao, Philippinen – Eine Untersuchung an 314 Probanden. Dissertation. Ludwig-Maximilians-Universität München, München

- Okrusch, M. / Matthes, S. (2010): Mineralogie – Eine Einführung in die spezifische Mineralogie, Petrologie und Lagerstättenkunde. Springer-Lehrbuch, Springer-Verlag
- Renner, H. / Schlamp, G. / Hollmann, D. / Lüscho, H. M. / Tews, P. / Rothaut, J. / Dermann, K. / Knödler, A. / Hecht, C. / Schlott, M. / Dreiselmann, R. / Peter, C. / Schiele, R. (2007): Gold, Gold Alloys, and Gold Compounds; in: Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry 2007, 6th edition
- Salhofer, S. / Spitzbart, M. / Schöps, D. / Meskers, C. E. M. / Panowitz, G. (2009): Verfahrensvergleich zur Gewinnung von Werkstoffen aus Elektrogeräten; in: Bilitewski / Werner / Janz (Hg.) (2009): Tagungsband zur Fachtagung "Brennpunkt ElektroG, Umsetzung - Defizite – Notwendigkeiten". *Beiträge zu Abfallwirtschaft/Altlasten*, Vol. 62, 23-29
- Sander, K. / Schilling S. (2010): Optimierung der Steuerung und Kontrolle grenzüberschreitender Stoffströme bei Elektrogeräten / Elektroschrott. Texte Nr. 11/2010, UBA-FB 001331, Förderkennzeichen 3708 93 300, Umweltbundesamt (Hg.), Dessau-Roßlau
- Spiegel Online (2000): Giftiges Zyanid läuft offenbar weiter aus. Artikel vom 02.02.2000; <http://www.spiegel.de/panorama/0,1518,65628,00.html> (11.01.2010)
- Umicore / Öko-Institut / GFMS (2005): Materials Flow of Platinum Group Metals – System Analysis and Measures for Sustainable Optimization of the Materials Flow of Platinum Group Metals
- Valdivia, S (2005): Ecological Backpack and Life Cycle Inventories of Precious Metals – Case Study: Gold from Peru. Pontificia Universidad Católica del Perú
- Wachter, K. (2003): Drei Jahre nach Baia Mare. Eine Nachbetrachtung der größten Gewässerverunreinigung Europas. Amt der NÖ Landesregierung, Abteilung Wasserwirtschaft; St. Pölten
- Wuppertal Institut (2003): Materialintensitäten von Materialien und Energieträgern im Überblick (MIT-Wertetabelle), Version 2 vom 28.10.2003; http://www.wupperinst.org/info/entwd/index.html?beitrag_id=437&bid=169

III. Indium

Dominic Wittmer,
Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie

III.1. Einleitung

III.1.1. Relevanz

Indium wird nur in geringen Mengen gewonnen, doch hat es in den vergangenen 20 Jahren einen rasanten Nachfrageanstieg erfahren (Niederschlag / Stelter 2009). Da es auf absehbare Zeit lediglich als Nebenprodukt ökonomisch gewonnen werden kann, ist eine Steigerung der Produktionsrate nur bedingt möglich. Infolge dieses rasanten Nachfrageanstiegs als Rohstoff in der Hochtechnologie ist es wiederholt zu vorübergehender Marktverknappung und erheblichen Preissteigerungen gekommen (Wiese 1981, Rüth 2010), in jüngster Zeit vor allem durch den Boom von Dünnschicht-Solarzellen. Da Dünnschicht-Solarzellen mit Indium auch in den modernen Dünnschicht-Solarzellen verwendet werden, gehört Indium zu jenen Metallen, die für die Umwelttechnik von Relevanz sind. Prognosen weisen darauf hin, dass sich für Indium der Bedarf bis 2030 stark erhöhen wird; bezogen auf die sogenannten Zukunftstechnologien Dünnschicht-Photovoltaik, Flüssigkristallanzeige (LCD) und weiße Leuchtdioden (LED) wird gar ein Bedarfsanstieg von 234 t auf über 1.900 t prognostiziert (Angerer et al. 2009).

Da Indium bei der Primärproduktion ausschließlich als Nebenprodukt gewonnen wird, ist es in Anbetracht seiner großen Bedeutung in Dünnschicht-Solarzellen und seiner begrenzten Substitutionsmöglichkeiten unklar, ob der Indiumbedarf bei rasch steigender Nachfrage mittelfristig gedeckt werden kann, zumal eine Steigerung des Angebots nur langsam möglich wäre (Reller et al. 2009, Tolcin 2009). In der Folge wird Indium in aktuellen Diskussionen häufig als eines jener Metalle angesehen, deren Verknappung droht (Bilow / Reller 2009, NRC 2008). Faulstich, Vorsitzender des Sachverständigenrats für Umweltfragen, spricht hierbei von „höchstem Knappheitsrisiko“ (Rüth 2009). Aus demselben Grund befasst sich die Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe im Rahmen des Programms „BGR 2000 – Metalle mit kurzer Reichweite“ aktuell weltweit mit Indium-Mineralisationen in Massivsulfidlagern (BGR 2008).

III.1.2. Charakteristika

Allgemeines

Indium wurde im Jahr 1863 von F. Reich und Th. Richter an der Bergakademie in Freiberg/Sachsen (Himmelfahrt Fundgrube) entdeckt (Niederschlag / Stelter 2009). Die Lagerstätten mit den größten Indium-Tonnagen befinden sich heute vor allem in China, Kanada, Russland, Japan und Portugal (Niederschlag / Stelter 2009)¹. Zu den größten Indium-Produzenten zählen Kanada, Russland, China, Japan, Korea, Belgien (Tolcin 2008). Chinas Hüttenproduktion wuchs in den vergangenen Jahren stark an, so dass dort im Jahr 2006 mehr als 350 t produziert wurden (ca. 60 % der globalen Produktion). Den größten Indiumverbrauch weist seit einigen Jahren Japan für seine Elektronikindustrie auf, wobei Südkorea und Taiwan starke Zuwächse verzeichneten (McMulloch 2000, Niederschlag / Stelter 2009).

Der TMR (Globaler Materialaufwand, engl.: *Total Material Requirement*) von Indium wurde bisher noch nicht detailliert untersucht, doch erste Untersuchungen gehen von Werten um 6 t/t Indium aus (Bringezu 2000).

Physikalische Eigenschaften

Indium ist ein silbrig-weißes Metall der 13. Gruppe des Periodensystems; als Pulver ist es schwarz. Es ist ein sehr weiches, duktiles und ausgesprochen gut verformbares Metall, selbst bei tiefen Temperaturen. Als Legierungselement dient es als härtendes Metall, das die Beständigkeit des legierten Metalls i. d. R. erhöht². Es weist mit 157 °C einen relativ niedrigen Schmelzpunkt auf, hingegen mit 2.080 °C einen hohen Siedepunkt. Außerdem ist es bei sehr tiefen Temperaturen supraleitend. Aufgrund seiner Dichte von 7,31 g/cm³ wird es als Schwermetall klassiert (Noël 1989). Seinen Namen erhielt es wegen seiner charakteristischen indigoblauen Spektrallinie bei der chemischen Untersuchung mittels Spektralanalyse (Noël 1989).

¹ für detaillierte Angaben siehe Schwarz-Schampera und Herzig (2002)

² Aufgrund seiner spezifischen Eigenschaften wird Indium auch als "Vitamin der Legierungen" bezeichnet.

Chemische Eigenschaften

Indium oxidiert bei Normalbedingungen nicht, sondern erst bei Erhitzung. In verdünnten Säuren von Chlorwasserstoff (HCl), Schwefelsäure (H₂SO₄) und Salpetersäure (HNO₃) löst es sich nur langsam; bei Erhitzung oder in konzentrierten Säuren löst es sich leichter. Gegenüber Basen ist metallisches Indium resistent. Es lässt sich mit den meisten Metallen legieren (Noël 1989). Die Reinheitsanforderungen sind abhängig von der Anwendung des Indiums (Wiese 1981).

Wichtige chemische Verbindungen

Indium wird nur untergeordnet in metallischer Form eingesetzt; viel häufiger ist der Einsatz in Verbindungen (Niederschlag / Stelter 2009, Greinacher 1987):

- Indium-Zinn-Oxid (ITO) ist optisch transparent bei gleichzeitiger elektrischer Leitfähigkeit; ITO enthält ca. 78 % Indium.
- Kupfer-Indium-Disulfid (CuInS₂) und Kupfer-Indium-Gallium-Diselenid (Cu(In,Ga)Se₂) sind Verbindungen, die Licht wesentlich besser als kristallines Silizium absorbieren, daher sind sie für eine Verwendung in Dünnschicht-Solarzellen als p-leitender Absorber geeignet. Die entsprechenden Solarzellen werden CIS/CIGS³-Solarzellen genannt.
- Indiumphosphid (InP) ist eine Halbleiter-Verbindung, die z.B. durch eine endotherme Reaktion von reinem Indium und Phosphor hergestellt wird.
- Indium(III)oxid (In₂O₃) ist mit Zinn(IV)-oxid (SnO₂) dotiert elektrisch leitend und darüber hinaus ein sehr guter Infrarotreflektor; es kann somit zur Wärmedämmung für Fenster und Solarzellen eingesetzt werden. Diese Anwendung hat heute an Bedeutung verloren.

Toxikologie und andere Gefahren

Es gibt keine Beweise von Gesundheitsschäden durch die industrielle Nutzung von (massivem) Indium⁴. Es besteht für Stäube jedoch eine Inhalationsgefahr, wobei es die Augen und Atemwege reizt. Bei Langzeitexposition gegenüber ionischem Indium besteht die Gefahr von Nierenschäden. Die Absorption im Menschen beträgt 0,5 % bei oraler Aufnahme und 5 % bei Aufnahme über die Atmung (nach Jorgenson / George 2005). Allerdings erscheinen die Angaben über die Wirkungen dieser Substanz auf die menschliche Gesundheit bisher als unzureichend. Die Maximale Arbeitsplatzkonzentration (MAK) von Indium beträgt 0,1 mg/m³ (Noël 1989, Jorgenson / George 2005). (IFA 2009)

³ CIGS-Solarzellen werden unter anderem CIGSSe-Solarzellen genannt.

⁴ Indium wird bislang als nicht umweltschädlich eingeschätzt und dient deswegen in manchen Fällen der Substitution von Quecksilber in Batterien oder von Blei in Spezialloten (Jorgenson / George 2005).

Im Gegensatz zu massivem Indium ist Indiumpulver ein leichtentzündlicher Feststoff, der nach Entfernung der Zündquelle an der Luft weiterbrennt und als Luftgemisch Explosionsgefahr birgt (ebenso im Kontakt mit Distickstofftetroxid/Acetonitril). Je feiner das Pulver ist, desto grösser ist die Explosionsgefahr. Es kann in gefährlicher Weise mit starken Säuren, Chlor, Phosphor, starken Oxidationsmitteln, Quecksilber(II)bromid, Selen, Tellur, Schwefel unter Feuer- und Explosionsgefahr reagieren. Indium ist praktisch unlöslich in Wasser und nicht flüchtig. Eine indirekte Gefahr droht dadurch, dass Stickstoffdioxid in Anwesenheit von Indium explodieren kann (Jorgenson / George 2005).

Vorkommen

Mit einer Häufigkeit in der Erdkruste von 0,1 ppm⁵ ähnelt Indium diesbezüglich Silber und ist damit als geochemisch seltenes Metall einzustufen (Alfantazi / Moskalyk 2003). Es tritt weitverbreitet auf, dabei in der Regel in geringen Konzentrationen – aufgrund seiner geochemischen Eigenschaften als Spurenelement von sulfidischen Mineralien. In natürlichen Vorkommen ist Indium eng mit den Buntmetallen Zink, Zinn, Kupfer, Blei, Cadmium, aber auch mit den Spurenmetallen Wismut, Germanium und Tellur sowie mit Silber assoziiert (Schwarz-Schampera / Herzig 2002). Bedeutendstes indiumführendes Mineral ist Zinkblende (Sphalerit), doch es kommt auch zu relativ hohen Indium-Konzentrationen in diversen Blei- und vor allem Kupfersulfiden wie Kupferkies (Chalkopyrit), Bornit, Kupferindig (Covellin) und Stannin, daneben in Bleiglanz (Galenit), Enargit, Antimonfahlerz (Tetraedrit) und Kupferglanz (Chalcocit). Als wichtigstes Oxid ist Zinnstein (Kassiterit) zu nennen (Noël 1989).

Die höchsten Indiumkonzentrationen weisen Zinnerze auf mit bis zu 1.000 g/t, wobei derartige Lagerstätten selten sind (Pohl 2005) und an Bedeutung verloren haben. Auch heute noch weisen Zinn- und Wolfram-Ganglagerstätten die höchsten Indiumkonzentrationen auf, jedoch ist die Gewinnung dieses Indiums subökonomisch (Tolcin 2008).

Heute wird Indium fast ausschließlich aus Zinkerzen gewonnen, wobei das bedeutendste Mineral der Sphalerit ist (Jorgenson / George 2005, Tolcin 2008)⁶; durchschnittliche Indiumkonzentrationen dieser Zinkerze sind 50 ppm, übliche Werte sind 1-100 ppm (Alfantazi / Moskalyk 2003). Bekannte Lagerstätten mit hohen Indiumgehalten sind die Huari Zinklagerstätte (Bolivien) sowie die Zinnlagerstätten in Cornwall (Vereinigtes Königreich) und New Brunswick (Kanada) (Noël 1989).

Reserven und Ressourcen von Indium sind aufgrund der auf Zinkrückständen basierenden Primärproduktion abhängig von den indiumführenden Zinkreserven bzw. -ressourcen (Jorgenson and George 2005). Einen geographischen Überblick über diese

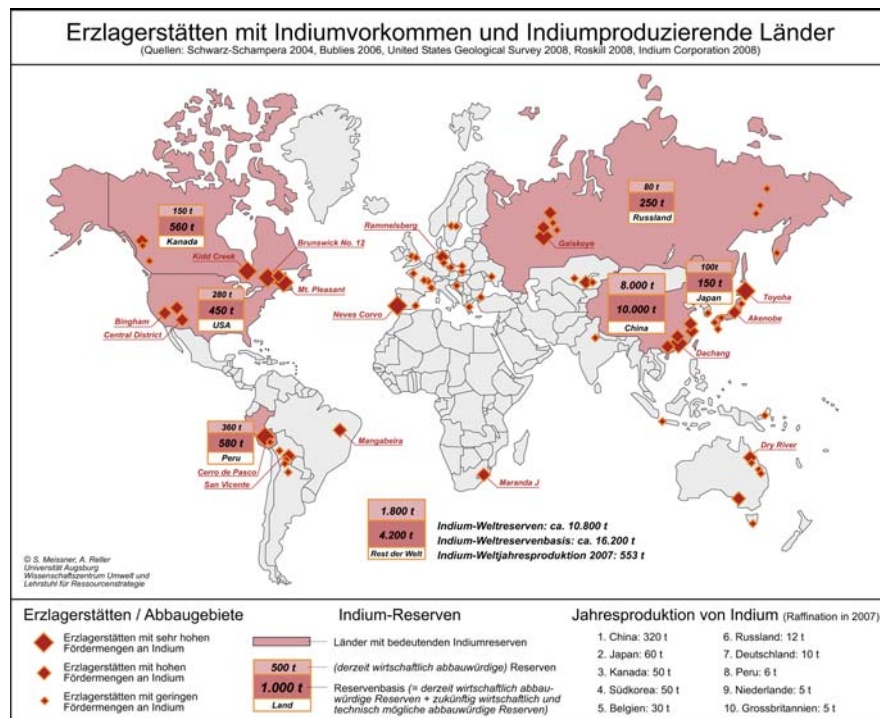
⁵ 0,05 ppm in der kontinentalen Erdkruste bzw. 0,07 ppm in der ozeanischen Erdkruste (Niederschlag / Stelter 2009).

⁶ Gediegenes Indium und die Indium-Mineralen Indit und Roquésit sind unbedeutend aufgrund ihres seltenen Vorkommens (Niederschlag / Stelter 2009).

globalen „Indiumlagerstätten“ liefert ein Fachartikel über Mobiltelefone von Reller et al. (2009) (Abb. III-1).

Die globalen Reserven von Indium wurden im Verlauf der vergangenen Jahren sukzessive höher eingeschätzt: Die jüngste Abschätzung beläuft sich auf ca. 50.000 t (Mikolajczak 2009); bisherige Schätzungen des U. S. Geological Survey zu 11.000 t wurden damit mehr als vervierfacht (Bezugsjahr 2008)(Tolcin 2008)⁷; auch auf diesen Wert wurde innerhalb nur eines Jahres von 2.800 t (Bezugsjahr 2007) erhöht, begründet durch eine Neubewertung der chinesischen Reserven (Rüth 2009)⁸. Bezogen auf die deutschen Indiumreserven wurde im Erzgebirge im Jahr 2009 von einer Lagerstätte mit knapp 1.000 t Indium berichtet (Schön 2009). Abschätzungen für die Ressourcen von Indium liegen nicht vor.

Abb. III-1: Geographische Verteilung bauwürdiger Vorkommen von Indium



Quelle: Reller et al. (2009)

⁷ Im Jahr 2009 werden in den USGS Mineral Commodity Series keine Abschätzungen für Reserven aufgeführt mit dem Hinweis, die Datenlage erlaube keine konsistente Angabe. Ferner werden im Jahr 2010 keine Reserven angegeben (USGS 2009, USGS 2010).

⁸ Der unvermutet rasche Anstieg der globalen Reserven ist bislang meist als Phänomen diskutiert worden. Als Ursache solch sprunghafter Anstiege werden Unsicherheiten bei der Reservenbestimmung angesehen (Rüth 2009, Ziemann et al. 2010). Eine nicht unerhebliche Rolle dürfte dabei der stark schwankende Rohstoffpreis haben. Da dadurch die Nachfrage beeinflusst wird, ergeben sich stark differierende und teils widersprüchliche Angaben zur statischen Reichweite (Bilow / Reller 2009).

III.1.3. Anwendungsbereiche

Die hauptsächlichen Anwendungsbereiche des Indiums sind Dünnschichtbeschichtungen, Legierungen, Lötmetalle, Halbleiter, elektronische Komponenten und der Einsatz als Legierungselement. Historisch wurde Indium anfangs primär zur Beschichtung von Lagern in Hochleistungs-Triebwerken von Flugzeugen eingesetzt (2. Weltkrieg), in den 1970er Jahren dann für Regelstäbe in Atomreaktoren; beide Anwendungsbereiche sind heute kaum mehr relevant für die Nachfrage. Hinzu kamen neue Anwendungen in schmelzbaren Legierungen, Lötmetallen und in der Elektronik (BGR 2008).

Mit Aufkommen der Halbleitermaterialien ITO, Kupfer-Indium-Disulfid und Indiumphosphid seit Ende der 1980er Jahre dominiert der Einsatz in diesen Dünnschichtbeschichtungen zunehmend die gesamten Anwendungen: Wurden 1996 in Dünnschichtbeschichtungen knapp 50 % des Indiums eingesetzt, stieg dieser Anteil seit 2003 rasant an auf 84 % in 2007. Entsprechend entwickelte sich die relative Bedeutung der anderen Anwendungen zurück, vor allem diejenige der Legierungen und Lötmetalle, welche 1996 noch über 30 % ausmachten (Niederschlag / Stelter 2009). Als Konsequenz ist der Indiumverbrauch weitgehend eine Funktion der weltweiten Produktion von LCD (BGR 2008) bzw. von Elektronikprodukten und/oder Fahrzeug- und Flugzeugverkäufen (Alfantazi / Moskalyk 2003).

Dünnschichtbeschichtungen in LCD

Fast alle hochauflösenden Farb-LCD und andere Bildschirme (Handy-Displays, Touchscreens) basieren auf dem Einsatz von Indium (McCulloch 2000). Man unterscheidet bei den LCD die *twist sematic/super-twistsematic LCD* (TN-LCD bzw. STN-LCD) von den höherwertigen *thin-film transistor LCD* (TFT-LCD). TFT-LCD sind zwar teurer, doch auch leistungsfähiger und benötigen pro Display weniger Indium als STN-LCD. Wegen ihrer besseren Bildqualität haben sich TFT-LCD mehr und mehr durchgesetzt (McCulloch 2000, Jakhanwal 2010).

Diese Anwendung nutzt die kombinierten Eigenschaften von ITO, sowohl optisch transparent, als auch elektrisch leitfähig zu sein. ITO besteht zu 90 % aus Indiumoxid und 10 % aus Zinnoxid. Als Substitute für ITO kommen Zinnoxid und Silber-Zinn-Oxid in Frage (Alfantazi / Moskalyk 2003), allerdings mit Abstrichen in der Funktionalität. Aufgrund der Preisvolatilität und drohender Verknappung wird zurzeit intensiv an Ersatzstoffen für ITO geforscht, darunter auch Antimon-Zinn-Oxid (ATO), das erfolgreich als Substituent in LCD getestet wurde (Tolcin 2008)⁹.

Dünnschichtbeschichtungen in Dünnschichtsolarzellen

Dünnschichtsolarzellen sind wesentlich dünner als herkömmliche Silizium-Solarzellen, flexibel im Einsatz und benötigen weit weniger Halbleitermaterialien; Indium kommt in

⁹ Infolge der Sorge um die Verknappung von Indium wurden Substitute für ITO gesucht, beispielsweise aluminium- oder galliumdotiertes Zinnoxid (Niederschlag / Stelter 2009).

Dünnschichtsolarzellen in Form von CIS oder CIGS (vgl. Kap. III.1.2) zum Einsatz (Niederschlag / Stelter 2009). Der Marktanteil von Dünnschichtsolarzellen (aller Typen) betrug im Jahr 2009 < 6 % und weist entsprechend viel Wachstumspotential auf. Herkömmliche Solarzellen können zur Effizienzsteigerung mit CIS dotiert werden, wobei der Indiumgehalt nur ca. 0,02 % beträgt (Sander 2009).

Legierungen

Indium wird in der Elektronik zur Herstellung niedrigschmelzender Lötlegierungen benötigt und dient dabei als Substitut für Blei (Noël 1989). Es existiert eine Vielzahl von indiumführenden Spezialloten mit spezifischen Schmelztemperaturen (Wiese 1981, Greinacher 1987). Daneben wird es in Zahnlegierungen zur Verbesserung der mechanischen Eigenschaften und zur Erhöhung der Farbechtheit eingesetzt (Noël 1989).

Regelstäbe in Kernreaktoren

In Kernreaktor-Kontrollstäben verwendet man Silberlegierungen mit einem Indiumgehalt von 15 % (Noël 1989). Ein möglicher Substituent ist Hafnium (Alfantazi / Moskalyk 2003).

Natrium-Niederdruck-Lampen (SOX lamps)

Eine dünne Indiumschicht auf der Innenseite des Glaskörpers dient dazu, die Effizienz der Lampe zu erhöhen. Hauptabsatzländer sind die Niederlande, Belgien und Großbritannien (Noël 1989).

Oberflächenschutz bei Gleitlagern

Diese Anwendung war bedeutend gewesen, doch heute hat sie keine wesentliche Bedeutung mehr (Pohl 2005).

Halbleiter, Laserdioden und Photodetektoren

Indium wird in diesen Anwendungsbereichen wegen seiner spezifischen optischen Eigenschaften eingesetzt. Als Halbleitermaterialien für die Optoelektronik, für die Thermistortechnik, Infrarotdetektoren und Kondensatoren sind hier vor allem Indiumphosphid, daneben auch Indiumarsenid (InAs) und Indiumantimonid (InSb) zu nennen¹⁰ (Noël 1989, Greinacher 1987). In Halbleitern ist sehr reines Indium erforderlich (Wiese 1981). Eine wichtige Anwendung der indiumführenden Halbleiter sind LED, wobei deren Farbe durch das eingesetzte Halbleitermaterial bestimmt ist.

Als Verbindungshalbleiter gelangt Indium zudem in verschiedenen Solarzellentypen zum Einsatz, wo es durch Galliumarsenid (Alfantazi / Moskalyk 2003), teilweise durch aluminiumdotiertes Zinkoxid, substituiert werden kann. In manchen Fällen ist eine Substitution durch Silizium möglich.

¹⁰ Einige dieser indiumhaltigen Halbleiter sind als toxisch einzustufen, jedoch aufgrund ihres Antimon- bzw. Arsengehaltes und nicht des Indiumgehaltes (Jorgenson / George 2005).

Kühlelement für Mikroprozessoren

Zur leistungsfähigen Kühlung von modernsten, sehr leistungsfähigen Mikroprozessoren wird eine Legierung von Gallium, Indium und Zinn eingesetzt, welche bei Zimmertemperatur flüssig ist (Burns 2008). Diese Anwendung weist keine relevanten Mengen auf.

Weitere Anwendungsbereiche sind *Transistoren*, *Fusibleindiumalloys* und *Alkali-Batterien* (Greinacher 1987, Noël 1989). Bei Alkali-Mangan-Batterien dient Indium als Ersatzstoff für Quecksilber.

III.2. Umweltbelastungen und Materialverluste

III.2.1. Abbau und Aufbereitung

Indium wird als Nebenprodukt von Schwermetallen gewonnen; ein Abbau von Indium als Hauptprodukt ist bis heute nicht wirtschaftlich (Greinacher 1987, Asian Metal 2008). Da als Ausgangsstoff für die Indiumproduktion Zinkerze stark dominieren (Niederschlag / Stelter 2009), wird im Folgenden die Aufbereitung/Produktion zur Vereinfachung ausgehend von ihnen erläutert. Die jährlich in Form von Zink- und anderen Erzen abgebaute Menge Indium beträgt ca. 1.500 t (Vulcan 2009), wovon jedoch ein Großteil während der Aufbereitung verloren geht.

Der Abbau und die Aufbereitung dieser Erze verursachen zwar Umweltbelastungen, jedoch werden als Ursache des Abbaus und der Aufbereitung im Allgemeinen die Hauptprodukte angesehen (das sind Zink, Zinn, Kupfer und Blei). Eine Allokation der Umweltbelastungen nach Metallerlösen bewirkt, dass dem Indium nur Umweltbelastungen von geringem Umfang zugeordnet werden¹¹. In diesem Sinne wird hier auf eine Untersuchung der Umweltbelastungen verzichtet.

In einer Tonne indiumführendem Zinkerz sind ca. 50 g Indium enthalten (vgl. Kap. III.1.2)¹². Wegen der relativ geringen Indiumkonzentrationen in den Zinkerzen sind die Indiumverluste bei der Aufbereitung beachtlich, insbesondere bezogen auf Erze mit geringen Indiumgehalten. Dies hat im Wesentlichen zwei Gründe:

- Ca. 30 % der gesamten indiumführenden Erze gelangen in Prozesse, die zur Indiumgewinnung ungeeignet sind (Mikolajczak 2009, Vulcan 2009)¹³. Beispielsweise gelangen beim Imperial-Smelting-Prozess 50 % des Indiums in unreines Rohblei (sogenanntes Werkblei), nur die verbliebenen 50 % Indium in den Zinkrückständen werden von geeigneten Anlagen gewonnen.
- Die restlichen 60-70 % werden – überwiegend im Rahmen der Zinkgewinnung – zu Prozessen geführt, die für die Indiumgewinnung geeignet sind (Mikolajczak 2009)¹⁴.

¹¹ Je nach Allokation werden der Gewinnung von Indium 6,9 % zugewiesen (ProBas 2010) bzw. 0,09 % (Classen / Scharnhorst 2009).

¹² Zwar gibt es Lagerstätten mit höheren Indiumkonzentrationen, doch sind diese ökonomisch nicht abbaubar: Aufgrund einer niedrigen Extraktionseffizienz bei der Indiumgewinnung ist bei der Primärproduktion von Indium entscheidend, dass bei den oben genannten Zwischenprodukten aus anderen Produktionslinien das Indium bereits aufkonzentriert ist.

¹³ Classen und Scharnhorst (2009) schätzen über die Berechnung der Indiumgehalte in den Ausgangserzen den Anteil, der in zur Indiumgewinnung ungeeignete Prozesse gelangt, mit 60 % bedeutend höher ein.

¹⁴ In den letzten Jahren wird eine drastische Steigerung von 30 % auf 80 % berichtet (Jorgensen / George 2005, Classen / Scharnhorst 2009), so dass eine durchschnittliche Ausbeute von 60-70 % plausibel ist.

Zwar lässt sich mit technischen Fortschritten die Ausbeute steigern und die Verluste – bei gleicher Konzentration – vermindern (Bilow / Reller 2009); allerdings sind dem möglicherweise ein höherer Energieverbrauch und/oder höhere Umweltbelastungen gegenüberzustellen.

Auf dieser Grundlage wird der resultierende Materialverlust auf 35-45 % geschätzt, d.b. ca. 500-700 t; die übrigen 800-1.000 t gelangen nicht in die Indiumgewinnung.

Tab. III-1: Umweltbelastung und jährliche Materialverluste beim Abbau und der Aufbereitung von indiumhaltigen Erzen

Prozess	Umweltbelastung	Materialverluste	Bemerkungen
Abbau und Aufbereitung der Zinkerze als Ausgangsrohstoffe für die Gewinnung von Indium	nicht bestimmt ¹⁵	500-700 t	Anteil, der bei der Aufbereitung der indiumführenden Zinkerze bei der Zinkproduktion verlorenght (also vor der Indiumgewinnung)

III.2.2. Indiumproduktion im Rahmen der Zinkgewinnung

Zu unterscheiden sind die Primärproduktion und die Sekundärproduktion. Es wird aktuell mehr Indium aus der Sekundärproduktion (Recycling von Zwischenprodukten) gewonnen als aus der Primärproduktion (Verarbeitung von Nebenprodukten der Aufbereitung von Buntmetallerzen). Da ca. 1.000 t Indium als ITO rezykliert werden, wird geschlossen, dass die obengenannten Angaben sich ausschließlich auf die Primärproduktion von Indium beziehen.

Primärproduktion von Indium

Die weltweite Primärproduktion von Indium steigt seit einigen Jahren an und betrug im Jahr 2007 573 t gegenüber 392 t im Jahr 2004 (Tolcin 2009); heute ist der mit Abstand wichtigste Produzent China (knapp 60 % der globalen Produktion), weitere wichtige Produzenten sind Japan, Kanada, Südkorea und Belgien (Reller et al. 2009)¹⁶.

Hauptausgangsprodukt der Primärproduktion von Indium sind Nebenprodukte metallurgischer Prozesse (Rückstände, Flugaschen, Schlacken), insbesondere der Schmelzprozesse der Zinkgewinnung aus indiumhaltigen Zinkerzen (Noël 1989, Niederschlag / Stelter 2009), mengenmäßig untergeordnet analog auch aus Nebenprodukten der Blei- und Zinnengewinnung (nach Classen / Scharnhorst 2009, BGR 2008, Pohl

¹⁵ Die Vorkette der Gewinnung und Aufbereitung von Zinkrückständen wurde vereinfachend vollständig zur Gewinnung und Aufbereitung von Zink alloziert. Begründung: Classen und Scharnhorst (2009) führen eine Allokation nach Metalllösungen durch, wobei lediglich 0,09 % der Belastung dem Indium angerechnet wird.

¹⁶ Es gibt zwei Produzenten von sekundärem Indium in den Vereinigten Staaten, deren Produktionsdaten jedoch nicht veröffentlicht sind.

2005). Aufgrund der niedrigen Ausgangskonzentrationen und der natürlichen Schwankungen der Zinkerze sind die Prozesse zur Indiumgewinnung in hohem Maß abhängig von der Zusammensetzung der Nebenprodukte – und damit auch der Zinkerze, denn die Indiumgewinnung erfolgt nahe den entsprechenden Abbauprozessen (Classen / Scharnhorst 2009). In der Folge handelt es sich um Prozesse, die in der Regel anspruchsvoll und komplex sind, da ein angepasstes Vorgehen mit einer geeigneten Kombination einer Vielzahl von chemischen und hüttentechnischen Verfahren anzuwenden ist (Greinacher 1987). Letztlich sind die Produktionsverfahren hütten-spezifische Entwicklungen, die verfahrenstechnisch abgestimmt sind auf die zahlreichen individuellen Ausgangsstoffe (Wiese 1981).

Im Jarosit-Prozess, einem bedeutenden Prozess der Indiumgewinnung aus Zinkerzen, können beispielsweise bis zu ca. 60 % des Indiums gelöst werden. Auf dieser Basis und weiteren Literaturangaben wird geschätzt, dass weltweit ca. 50 % des Indiums gewonnen werden, das in zur Indiumgewinnung geeignete Prozesse geführt wird (Jorgensen / George 2005, Classen / Scharnhorst 2009, Vulcan 2009).

Laut Aussage der Indium Corporation können heute lediglich 30 % des in Erzen abgebauten Indiums gewonnen werden (Vulcan 2009); bezogen auf die jährliche Primärproduktion (1.500 t/a) wären dies ca. 450 t. Da Vulcan jedoch kein Bezugsjahr dafür angibt, kann kein Widerspruch zur vom U. S. Geological Survey für das Jahr 2007 berichteten Menge festgestellt werden (Vulcan 2009, Tolcin 2009). Für diese Studie wird daher von der vom U. S. Geological Survey geschätzten Primärproduktion von ca. 600 t ausgegangen.

Der Rest des Indiums, der in zur Indiumgewinnung geeignete Prozesse geführt wird, verbleibt in indiumführenden Rückständen, deren Indiumfracht bisher grob auf ca. 500 t/a geschätzt werden (Mikolajczak 2009). Aus Gründen der Indiumbilanzierung des Prozesses Produktion wird dieser Wert als leicht zu hoch eingeschätzt und in dieser Studie auf 350-550 t/a geschätzt.

Im Folgenden werden einige spezifische Aspekte der Primärproduktion näher beschrieben.

Produktion aus gebrannter Zinkblende/Zinkoxidrauch¹⁷:

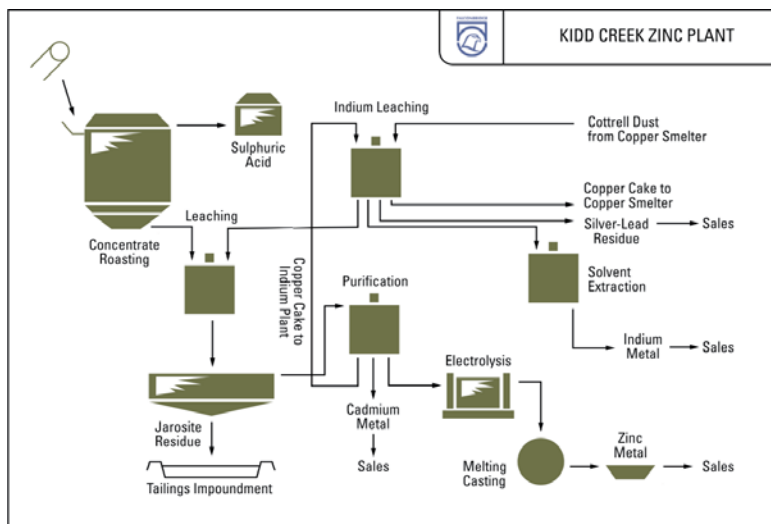
Aus kalzinierter bzw. gebrannter Zinkblende wird in einem ersten Schritt Indiumschwamm hergestellt, aus dem anschließend metallisches Indium produziert wird. Der Ablauf lässt sich vereinfacht wie folgt darstellen (Noël 1989):

¹⁷ Hier dargestellt ist der Produktionsprozess der Anaconda Copper Mining Company.

1. Zweistufige Laugung mit Schwefelsäure (H_2SO_4)(verd.)¹⁸,
2. Ausfällen mittels Zinnoxid und Natriumhydrogensulfit,
3. Laugung mit Natriumhydroxid (NaOH)(konz.),
4. Laugung des Rückstandes mit Schwefelsäure (verd.),
5. Lösung und Abtrennung von Schwermetallen mittels Schwefelwasserstoff (H_2S) und
6. Indiumschwamm.

Ein ähnliches Verfahren ist in *Abb. III-2* zur Veranschaulichung dargestellt, um die Abhängigkeiten vom Zinkgewinnungsprozess zu veranschaulichen (hier: Indiumproduktion integriert in das Kidd-Creek-Verfahren).

Abb. III-2: Schematische Darstellung des Kidd Creek Zink-Prozesses



¹⁸ Eine detaillierte technische Untersuchung des Röstprozesses und der ersten Stufe der Schwefelsäurelaugung wird von Chegrouche et al. (2001) beschrieben.

Quelle: Jorgenson und George (2005)

Der Indiumschwamm wird über erneutes Laugen mit Chlorwasserstoff (HCl), Reinigung mittels Bariumchlorid (BaCl_2), Natriumhydroxid und Schwefelwasserstoff sowie Elektrolyse in metallisches Indium überführt, seltener direkt über Schmelzprozesse. Es treten relevante Indiumverluste bei der Laugung mit Schwefelsäure auf, die ca. 50 % betragen können (Chegrouche et al. 2001, Classen / Scharnhorst 2009). Zudem ist zu beachten, dass grundsätzlich die Qualität der Prozesse zur Konzentrierung bzw. Raffination von der „passgenauen“ Einstellung der Prozesse auf die Rohstoffe abhängen. Wechselnde Rohstoffquellen erschweren dies und damit auch die Minimierung der Materialverluste und der Umweltbelastungen (vgl. Box 1). Es drohen Gewässerverschmutzungen durch Cadmium, Arsen, Thallium und Ammoniumsalze (Wiese 1981). Darüberhinaus droht bei Versorgung mit wechselnden Rohstoffen die Effizienz zu sinken, da die Optimierung des Prozesses nicht in gleicher Weise abgeschlossen werden kann.

Box 1: Produktionsstruktur von Indium

Es gibt ca. 30 bis 40 Produktionsstätten weltweit, die Indium in handelbarer Form bzw. seine Legierungen herstellen (Jorgenson / George 2005). In Deutschland wird Indium aus sekundären Rohstoffen von den Firmen PPM Pure Metals GmbH und Aurubis AG¹⁹ hergestellt. Aurubis verbraucht sein Indium zur Produktion von Photovoltaikzellen. In Belgien produziert die Firma Umicore knapp 50 t/a Indium, meist durch Gewinnung aus Rückständen der Produktion von anderen Metallen (Rüth 2009).

Raffination

Ein häufiges Zwischenprodukt der Produktion ist Indiumschwamm mit Konzentrationen bis zu 99,5 % Indium; diese Reinheit reicht jedoch in der in der Regel nicht aus, da der Funktionswerkstoff Indium für die spezifischen Anwendungen beispielsweise in der Elektrotechnik oder der Halbleiterindustrie in höchster Reinheit erforderlich ist (Greinauer 1987, Pohl 2005). Daher wird zusätzlich eine elektrolytische Raffination durchgeführt. Gehen die Anforderungen darüber hinaus, d. h. Konzentrationen bis 99,99999 % (7N), so sind weitere Verfahren erforderlich wie mehrstufige Raffinationen, eine Vakuumdestillation (bei 1.400 °C) oder sogenanntes Zonenschmelzen.

Ionenaustauschverfahren

Eine zusätzliche Möglichkeit der Reinigung ist der Ionenaustausch, wobei zwei Verfahren unterschieden werden (Wiese 1981):

- Bei Festbett-Ionenaustauschverfahren, die einen hohen spezifischen Chemikalienaufwand erfordern, fallen niedrigkonzentrierte Lösungen an, so dass die Material-

¹⁹ ehemals Norddeutsche Affinerie AG

verluste relativ hoch sind²⁰. Abwasserbelastungen drohen bei Einsatz von Ammonsalzen als Elutionsmittel.

- Bei Ionenaustauschern mit Flüssig-Flüssig-Extraktion können organische Lösungsmittel das Abwasser belasten; auch erfordern die Arbeitsplätze einen angepassten Arbeitsschutz.

Mehrere Hüttenwerke deponieren die indiumhaltigen Aufbereitungsrückstände separat. Aufgrund des großen Aufwandes zur Indiumextraktion wurden diese Rückstände nicht behandelt. Bei entsprechender Marktlage können diese Deponiekörper gezielt aufbereitet werden. Die Rückstände umfassen 15.000 t Indium und werden jährlich um ca. 500 t Indium erhöht (Mikolajczak 2009). Sobald geeignete kostendeckende Abbaustrukturen verfügbar sind, können derartige „sekundäre Lagerstätten“ abgebaut werden (Hagelüken / Meskers 2010).

Tab. III-2: Umweltbelastungen und jährliche Materialverluste bei der primären und sekundären Indiumproduktion

Prozess	Umweltbelastung	Materialverluste	Bemerkungen
Rösten von Rückständen der Zinkproduktion	Energieverbrauch; Schwefelsäure-Emissionen (bei sulfidischen Erzen)		Rösttemperatur bis 900 °C, bis 4 h
Säuren-Extraktion Zinkblende/Rückstände	Schwefelsäure (verd.); ca. 0,15 kg Schwefelsäure (25 %)/kg Indium, Emission teils als Säure-Nebel, flüchtige organische Verbindungen; Einsatz von organischen Lösungsmitteln ²¹	bis 50 %	
Ausfällen	Natriumhydrogensulfit	vernachlässigbar	
Basen-Extraktion	Natriumhydroxid (konz.)	vernachlässigbar	
Abtrennung Schwermetalle	Schwefelwasserstoff; Abwasserbelastung durch Cadmium, Arsen, Thallium und Ammoniumsalzen ^{20,22}	vernachlässigbar	
elektrolytische Raffination	Chlorgas-Emission; Energieverbrauch: 0,2-0,5 kWh/kg Indium ²²	vernachlässigbar	Chlorgas-Emission ist vermeidbar durch Zweikammerzelle
Festbettionenaustauschverfahren	Ammonsalze im Abwasser	relativ hoch	
Ionenaustauschern mit Flüssig-Flüssig-Extraktion	organische Lösungsmittel im Abwasser	vernachlässigbar	

²⁰ Die Materialverluste beim Ionenaustauschverfahren konnten nicht quantifiziert werden.

²¹ nach Classen und Scharnhorst (2009)

²² Gemäß Noël (1989) ist uneindeutig, ob in diesem Prozess oder bereits zuvor die Schwermetallbelastungen auftreten können.

Prozess	Umweltbelastung	Materialverluste	Bemerkungen
Vakuum-Destillation	Energieverbrauch > 0,5 kWh/kg Indium; Schutzgas vernachlässigbar ²²	vernachlässigbar	
Total		350-550 t	

Quelle: abgeleitet von Noël (1989)

III.2.3. Produktion indiumhaltiger Produkte

Indium wird in diversen Produkten als Funktionswerkstoff eingesetzt. Die bedeutendsten Produkte hinsichtlich des Indium-Einsatzes werden im Folgenden erläutert:

LCD-Bildschirme

ITO ist in LCD enthalten (siehe Kap. III.1.3). Der hauptsächlich angewandte Prozess zum Beschichten der Targets²³ wird *sputtering* genannt. Der größte Teil des ITO wird zum *sputtering* des Target-Materials eingesetzt; ein kleinerer Teil pures Indium wird als Bonding-Material eingesetzt, um das ITO an die Rückseite des Displays zu befestigen. Ein solches Target kann bis zu tausend Mal zum Beschichten von Gläsern mit ITO genutzt werden, denn die Glasbeschichtung ist < 1 µm dünn; bei STN-LCD beträgt sie 2 x 300 nm, bei TFT-LCD beträgt sie 280 nm (McCulloch 2000). Ein Flachbildschirm (32 Zoll) enthält ca. 0,18 g Indium (nach Niederschlag / Stelter 2009).

In Japan, das als großer Elektronik- und Bildschirmproduzent der Hauptverbraucher von ITO ist, stammt das Gros des Indiums in der ITO-Produktion aus der Sekundärproduktion (ITO rezykliert aus Produktionsschrotten der LCD-Produktion).

Bei der Produktion von Bildschirmen treten indiumhaltige Abfälle im Wesentlichen in zwei Stufen auf (Abbildung 3): Zum einen werden aus technologischen Gründen nur ca. 30 % der ITO-Targetmasse tatsächlich für den Prozess genutzt; die anderen 70 % bleiben als unverbrauchte, da nicht nutzbare Targetmasse zurück²⁴. Letztere gelangt durch eine Rückgewinnung, für welche sehr ausgereifte Anlagen erforderlich sind, und nach kurzer Bearbeitung erneut als ITO-Targets in den Produktionsprozess der LCD zurück (Meskers et al. 2010, van den Broeck 2009)²⁵.

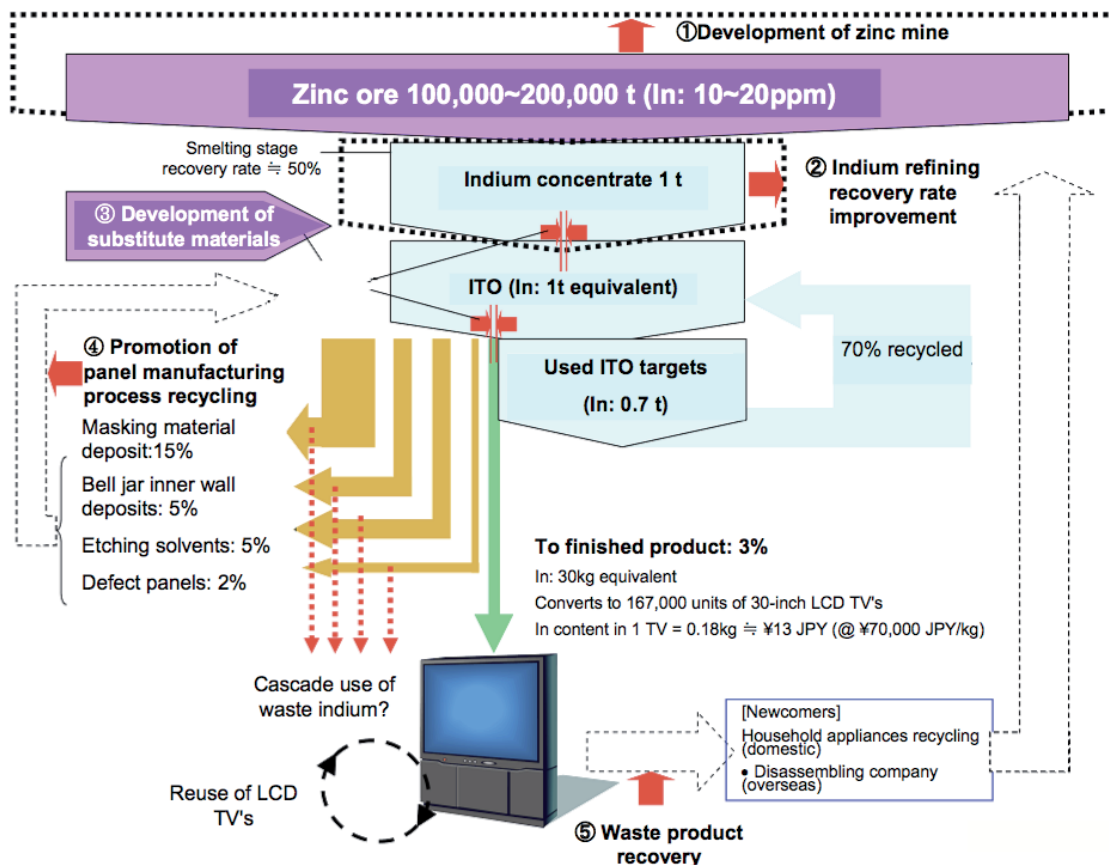
²³ Targets sind feste Körper, die an der Oberfläche durch Teilchenbeschuss zerstäubt werden und als Ausgangsmaterial für die gewünschte Schicht auf einem weiteren Festkörper dienen, das sogenannte Substrat. Die Herstellung von großen Sputtering-Targets ist in der Regel aufwendig; die Firma Japan Energy kann solche Targets mit einer Größe bis zu 81 cm x 91 cm herstellen (McCulloch 2000).

²⁴ Seit einigen Jahren werden zunehmend sogenannte rotary targets eingesetzt, welche eine wesentlich höhere Ausnutzung der Targetmasse erlauben (bis zu 90 %) (Hagelüken 2011).

²⁵ In Deutschland ist grundsätzlich die Sammlung von Kleinmengen von Indiumrückständen in Sammelbehältern vorgesehen, um eine Wiederverwendung oder ein Recycling zu ermöglichen

Zum andern gelangen beim *sputtering* von den verbrauchten Indiummengen aufgrund Prozessineffizienz nur ca. 10 % auf die Glassubstrate, während die anderen knapp 90 % als Produktionsabfall auftreten, z.B. Abscheidungen auf Masken, Abscheidungen in den Anlagen und in Ätzlösungen, oder auf defekten Displays verbleiben (Kawamoto 2008). Grundsätzlich sind diese indiumhaltigen Abfälle aus dem *sputtering* rezyklierbar, doch aufgrund der vorhandenen Datenlage ist der Umfang, in dem diese Fraktionen rezykliert werden, nicht beurteilbar; zudem spielt für eine auf das Kalenderjahr bezogene Bilanzierung eine Rolle, wie häufig derartige Abfälle innerhalb eines Jahres rezykliert werden, um daraus die akkumulierten Verluste zu bestimmen. Aufgrund dessen werden in der LCD-Produktion relevante Recyclingpotentiale für das Indium gesehen.

Abb. III-3: Indium im Lebenszyklus eines Flachbildschirms. Darstellung der Materialverluste als orangene Flüsse



Quelle: Kawamoto (2008)

Dünnschichtsolarzellen

CIS und CIGS werden in Dünnschichtsolarzellen eingesetzt (siehe Kap. III.1.3). Der Aufbau dieser Solarzellen ist aufgrund seiner Vielschichtigkeit komplex; der Gehalt von

(GESTIS 2009).

Indium beträgt ca. $1,45 \text{ g/m}^2$ (Niederschlag / Stelter 2009).

Mobiltelefone

Indium ist ein Spurenstoff in Mobiltelefonen (Reller et al. 2009), wo es in LCD verwendet wird. Im Jahr 2010 wurden bereits 1,6 Mia. Mobiltelefone verkauft bei weiter rasant wachsendem Mobiltelefonmarkt (Hagelüken 2011); die Produktion dieser Menge Mobiltelefone entspricht einem Einsatz in diesem Bereich von jährlich ca. 3 t Indium.

Japan ist aufgrund seiner bedeutenden Rolle im Elektronikbereich seit Jahren der größte Konsument von Indium – es verarbeitet im Jahr 2002 ca. 60 % des weltweiten Verbrauchs, gefolgt von den Vereinigten Staaten mit 21 % (nach Kawamoto 2008). Der weltweite Verbrauch im Jahr 2004 wurde auf Basis dieser Daten durch Hochrechnung berechnet (Tab. III-3). Es ist jedoch zu beachten, dass der Markt sich sehr rasch entwickelt. Beispielsweise wuchs der Markt für LCD-Fernsehbildschirme rasant an: Im Jahr 2006 wurden 46 Mio. verkauft, im Jahr 2008 bereits 98 Mio. (Bilow / Reller 2009).

Tab. III-3: Verteilung des Einsatzes von Indium im Jahr 2004 auf verschiedene Anwendungsbereiche, in t pro Jahr, für die Vereinigten Staaten, Japan und die Welt (geschätzt);
*: einschließlich Einsatz von 35 t Indium in bonding agents, zur Befestigung der Targets auf den Bildschirmen

Anwendungsbereiche	USA	Japan	Welt
Dünnschichtfilme	49	505*	684
Legierungen und niedrigschmelzendes Lötmetall	33	6	48
elektrische Komponenten und Halbleiter	14	12	32
Forschung und übrige Nutzungen	4	16	25
Total	100	541	789

Quelle: nach Alfantazi und Moskalyk (2003), Tolcin (2008), Kawamoto (2008); eigene Abschätzung des weltweiten Einsatzes auf Basis der Daten für Japan und die Vereinigten Staaten, 2004

Die Hochrechnung ergibt für das Jahr 2004 einen weltweiten Indiumeinsatz von knapp 800 t Indium. Dies ist deutlich mehr als die jährlich knapp 600 t Indium, die für die Primärproduktion für das Jahr 2007 angegeben wird – trotz tendenziell steigendem Einsatz. Aufgrund der Datengrundlage dieser beiden Schätzungen wird in dieser Studie der Wert für die Primärproduktion (jährlich 600 t Indium) als plausibler bewertet. Die Abweichung kann teils durch die jährlichen Schwankungen des Umsatzes der rezyklierten Mengen begründet werden.

III.2.4. Nutzung

Die Nutzung von Indium bei Endverbrauchern verteilt sich auf die diversen Anwendungen (vgl. Kap. III.1.3). Allerdings ist die heutige weltweite Verteilung des Indiums auf

Endnutzungen nicht genügend bekannt. In der Nutzungsphase sind keine Umweltbelastungen und Materialverluste von Indium bekannt.

III.2.5. Recycling

Generell nehmen die Recyclingaktivitäten hinsichtlich Indiums zu (Bilow / Reller 2009). Es ist dabei das Recycling von Neuschrotten und von Altschrotten zu unterscheiden. Das Recycling von Neuschrotten ist für Indium viel bedeutender als jenes von Altschrotten, einerseits aufgrund der relativ großen Menge Indium in den Neuschrotten, andererseits aufgrund der erleichterten Rezyklierbarkeit gegenüber Altschrotten. Angaben für die globalen Recyclingmengen von Indium sind nicht verfügbar.

Neuschrotte

Für Neuschrotte gibt es bereits rentable Rückgewinnungsmöglichkeiten; die Indiumkonzentrationen und die auftretenden Indiummengen sind im Vergleich zu Altschrotten hoch. Rückgewinnungsmöglichkeiten gibt es sowohl bei der Herstellung von CIS/CIGS-Solarzellen, als auch von LCD. Beispielsweise können hochspezialisierte Recyclinganlagen mittlerweile auch das Indium aus z.B. hochwertigen CIGS-Schrotten rückgewinnen (Meskers 2010), welche bei der Herstellung von CIGS-Solarzellen beim *sputtering* mit Indium, Gallium, Selen und Kupfer anfallen. Diese Niederschläge werden von den Wänden der Sputter-Kammern abgekratzt und gesammelt (sogenannte *scrapings*) (Hagelüken 2011).

Neuschrotte weisen Recyclingraten von durchschnittlich 70 % auf (Niederschlag / Stelter 2009); dies gilt auch für ITO-Targets (Mikolajczak 2009). Das meiste Indium wird daher als ITO rückgewonnen (Abb. III-3). Das ITO-Recycling findet konzentriert in Japan, China und der Republik Korea statt, also dort, wo auch die ITO-Produktion konzentriert ist (Tolcin 2008). Das bestentwickelte Recyclingsystem für Indium ist in Japan zu finden. Der Konzern Dowa rezykliert 200 t/a und ist damit eines der großen Recyclingunternehmen (Rüth 2009).

Die Menge Indium, die durch Rückgewinnung aus den ITO-Targets gewonnen wird, erreichte nahezu 1.000 t/a (Mikolajczak 2009). Die Menge der Materialverluste ist weiterhin unbestimmt. Gemäß Abbildung 3 gelangten ca. 90 % des nicht rezyklierten ITO (bezogen auf LCD) in diverse Verlustfraktionen. Dies konnte nicht abschließend auf Plausibilität geprüft werden.

Altschrotte

Wegen der geringen Indiumkonzentrationen ist das Recycling von Altschrotten erschwert²⁶ (Rüth 2009). Das Metallrecycling aus Solarmodulen ist auch heute noch in

²⁶ Ein 32-Zoll-LCD-Flachbildschirm enthält ca. 0,18 g Indium, was lediglich einem Indiumwert von €0,08 entspricht (Niederschlag / Stelter 2009).

vielen Fällen unrentabel, da durch die Laugung eine Lösung von einem Gemisch von Metallen entsteht, das aufwendige Trennprozesse erfordert, beispielsweise mehrstufige Flüssig-Flüssig-Extraktionen. Ebenso ist das Recycling von Indium in LCD noch weitgehend unrentabel (Niederschlag / Stelter 2009) und noch nicht ausgereift; heute wird aus EE-Schrotten überwiegend Gold und Kupfer rückgewonnen (Rüth 2009) – in Schwellenländern häufig unter sehr einfachen Bedingungen. Hierbei ist davon auszugehen, dass das Indium komplett verloren geht (die Bildschirme gelangen in die Müllverbrennungsanlagen).

Beim Recycling von Indium aus LCD sind hochentwickelte Recyclingprozesse erforderlich; daneben ist der sichere Umgang mit den Quecksilbergehalten der LCD-Hintergrundbeleuchtung von hoher Relevanz (Meskers et al. 2010). Die Rückgewinnung von Indium aus Altschrotten hat sich bisher teils in Japan etabliert; es ist von neuen Recyclingprozessen für LCD berichtet worden, bei denen nach Brechen des Glases eine Indiumextraktion vorgenommen wird, welche kostengünstig und einfach ist (Kawaguchi 2008). Im Jahr 2010 wurden auch in Europa entsprechende Aufbereitungsprozesse für sogenannte *sputtering targets* zur Marktreife entwickelt (Meskers et al. 2010, Hagelüken / Meskers 2010).

Seit April 2009 gilt in Japan eine Verordnung, nach der von den Herstellern auch LCD- und Plasma-Fernsehergeräte wiederzuverwerten oder wiederzuverwenden sind. Gleichzeitig soll der Einzelhandel dafür sorgen, die Lebensdauer dieser Geräte durch Wiederverkauf zu erhöhen (Aritake 2008). Das japanische Ministerium für Wirtschaft, Handel und Industrie und das japanische Ministerium für Umwelt erwarten allgemein, dass die Wiedernutzungsrate für Flachbildfernseher bedeutend höher ist als für die auslaufenden Röhrenmodelle, da sie mehr Teile aufweisen, die wiederverwendet werden können (Aritake 2008). Daneben wurde auch das Recycling von Indium (neben Gallium) aus verbrauchtem Halbleitermaterial berichtet (Noël 1989). In Deutschland gibt es keine nennenswerte Indium-Rückgewinnung.

Die Materialverluste aus EE-Schrotten und Photovoltaik-Schrotten sind aufgrund des zurzeit noch geringen Anfalls indiumführender Altschrotte ebenfalls gering.

Tab. III-4: Umweltbelastung und jährliche Materialverluste beim Recycling von Indium

recyklierter Stoffstrom	Umweltbelastung	Materialverluste	Bemerkungen
ITO <i>sputtering targets</i> (bei der LCD-Produktion)	keine bekannt	Neuschrotte: vermutlich gering Altschrotte: gering	Der Verbleib des Indiums und damit die Materialverluste sind nicht ausreichend bestimmt

Sekundärproduktion von Indium

Die Sekundärproduktion von Indium basiert vor allem auf der Rückgewinnung des Indi-

ums von indiumhaltigen Elektronikprodukten bzw. -bestandteilen. Dies umfasst einerseits Bauteile, die aus der Produktion anfallen (Neuschrott), andererseits die entsorgten Bauteile (oder Produkte) nach der Nutzungsphase (Altschrotte).

Produktion aus sekundärem Zinkoxid

Aus sekundärem Indiumoxid wird zuerst Roh-Indiumhydroxid hergestellt, um es anschließend zu Indiumzement weiterzuverarbeiten (Noël 1989) (vgl. Tab. III-2):

1. Vorlaugung mit Schwefelsäure (verd.),
2. Laugung des Rückstandes mit Chlorwasserstoff (verd.),
3. Neutralisierung des Filtrats, anschließend Ausfällung,
4. Laugung des Rückstandes mit Natriumhydroxid; man erhält Roh-Indiumhydroxid,
5. Laugung des Roh-Indiumhydroxids mit Chlorwasserstoff (verd.),
6. Zweistufige Abtrennung von Störstoffen durch Eisen-/Indium-Zementation und
7. Zementation von Indium mit Aluminium; man erhält Indiumzement.

Auch der hergestellte Indiumzement ist für die meisten Anwendungen nicht ausreichend rein. Die benötigte Reinheit wird durch eine anschließende Raffination plus gegebenenfalls Ionenaustausch erreicht (siehe Kap. III.2.2).

III.2.6. Indium in die Deponien

Indium wird aufgrund seiner Seltenheit und seines relativ hohen Wertes nicht in metalischer Form deponiert. Jedoch gelangen indiumführende Elektronikschrottfractionen teilweise via Müllverbrennung oder mechanisch-biologische Abfallbehandlung auf Deponien. Da der Eintrag von Indium aus Produktion, Nutzung und Recycling in die Umwelt vernachlässigbar ist (vgl. Kap. III.2.7), ist davon auszugehen, dass der größte Teil der Verluste aus diesen Prozessen in den Deponien akkumuliert.

Tab. III-5: Umweltbelastung und jährliche Materialverluste durch Eintrag von Indium in die Deponien

Fraktion/Deponietyp	Umweltbelastung	Materialverluste	Bemerkungen
Elektro- und Elektronikschrott auf Deponien	unbekannt	unbekannt	Im Allgemeinen können durch die Behandlung von EE-Schrotten Umweltbelastungen auftreten ²⁷

In Deutschland sind Indiumabfälle wenn möglich zu verwerten; wenn eine Verwertung

²⁷ Auf eine Betrachtung der Umweltbelastungen, die im Rahmen der Behandlung von EE-Schrotten auftreten können, wird hier verzichtet. Nur ein Teil der Elektronikverwerter gewinnen Indium zurück. Auch wenn Indium rückgewonnen wird, ist davon auszugehen, dass in den meisten Fällen die Rentabilität auf der Rückgewinnung anderer Wertstoffe beruht.

nicht möglich ist, müssen sie unter Beachtung der örtlichen behördlichen Vorschriften beseitigt werden (IFA 2009). Indium gilt in Deutschland als „gefährlicher Abfall“ nach der Abfallverzeichnis-Verordnung (AVV).

III.2.7. Indium in die Umwelt und andere Senken

Der bedeutendste Eintrag in die Umwelt bzw. andere Senken ist der Anteil der indiumführenden Zinkerze, der nicht in Prozesse gelangt, die zur Indiumgewinnung geeignet sind. Es handelt sich um 500-700 t/a.

Trotz zahlreicher Anwendungsgebiete treten daneben keine relevanten Indiumverluste in die Umwelt auf, da Indium nur in geringen Mengen umgesetzt wird und es praktisch nicht wasserlöslich oder flüchtig ist.

Die freigesetzten Indiummengen sind daher relativ gering. Bislang sind keine relevanten Umweltbelastungen durch Indium bekannt.

III.3. Fazit

III.3.1. Verbesserungspotential

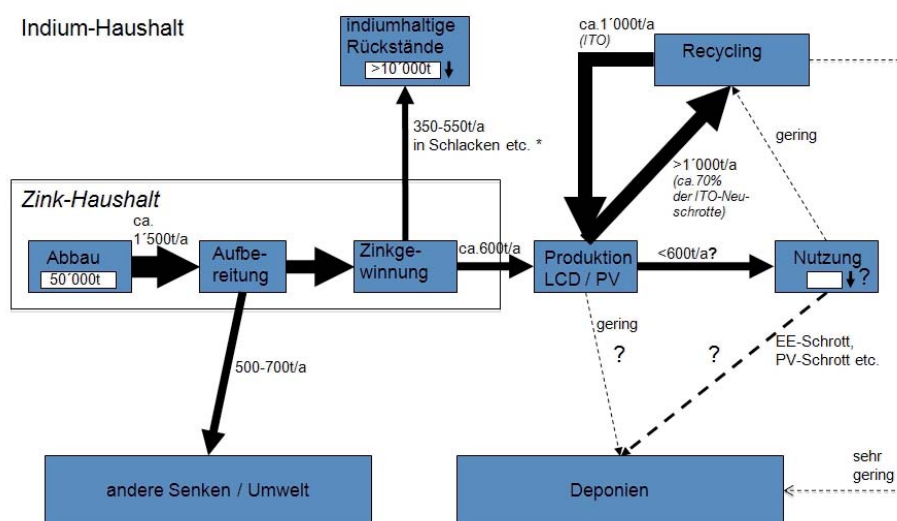
Umweltbelastungen

Die Untersuchung entlang des Lebensweges von Indium ergibt, dass die hauptsächlichen Umweltbelastungen von der Produktion ausgehen. Hingegen sind bislang während und nach der Nutzung keine relevanten Belastungen von Indium und seinen Verbindungen erkennbar.

Materialverluste

Materialverluste treten hauptsächlich in der Primärproduktion/Erzaufbereitung und in der Sekundärproduktion auf. Während der Nutzung treten keine relevanten Verluste von Indium auf, jedoch wird weltweit bislang nur ein sehr kleiner Teil des Indiums in Endprodukten rezykliert (Abb. III-4).

Abb. III-4: Stoffhaushaltssystem Indium mit jährlichen Flüssen. Bezugsraum: Welt. LCD: liquid crystal display, PV: Photovoltaik, EE-Schrott: Elektro- und Elektronikschrott, ITO: Indium-Tin-Oxide.
*: Die Verluste sind prozessabhängig: Sowohl bei pyrometallurgischer, als auch bei hydrometallurgischer Gewinnung treten relevante Verluste auf.



Die Materialverluste, die in der Primärproduktion auftreten, werden in der vorliegenden Fachliteratur nicht hinsichtlich der Verbesserungspotentiale diskutiert. Ein Teil der Materialverluste tritt in den Prozessen der Zinkgewinnung auf, die zwar als Vorprozesse der Indiumgewinnung zu verstehen sind, doch bislang ausschließlich hinsichtlich der Gewinnung von Zink optimiert sind. Bei steigenden Preisen für Indium dürfte der Anreiz, diese auch an Indium auszurichten, steigen. Materialverluste, die in der Sekun-

därproduktion auftreten, werden zunehmend hinsichtlich ihres Verbesserungspotentials beleuchtet; beispielsweise werden derartige Möglichkeiten von Hagelüken und Messers (2010) qualitativ beschrieben.

Schwierigkeiten bei der Rezyklierung von Altschrotten ergeben sich daraus, dass Indium einerseits in den Endprodukten sehr gering konzentriert ist und andererseits nicht mit anderen hochwertigen Metallen²⁸ bzw. Werkstoffen vergesellschaftet ist; so trägt neben Indium kein weiteres Metall bei der Rückgewinnung von LCD-Flachbildschirmen zur Rentabilität bei – im Gegensatz zu beispielsweise Leiterplatten, bei denen in integrierten Metallhütten diverse Metalle rückgewonnen werden können (Hagelüken 2011). Wird das Indium nicht gezielt rezykliert, so droht ein Verlust vorwiegend in die Deponien, wobei dieses Indium kaum mehr rückgewonnen werden kann (Reller et al. 2009). Der Rücklauf von indiumführender Elektronik, z.B. LCD-Flachbildfernseher, ist zurzeit noch sehr gering, doch bald ist mit stark ansteigenden Stückzahlen zu rechnen, wodurch positive Skaleneffekte erwartet werden. Durch Konzentrierung der LCD in einem angepassten Sammelsystem lässt sich möglicherweise die Rentabilität ausreichend steigern, so dass die Rückgewinnung von Indium lohnend wird (Angerer et al. 2009).

III.3.2. Methodische Schwierigkeiten

Relevante Datenlücken

Die *Minor Metals Trade Association* repräsentiert Firmen, die sich im Handel jener Metalle betätigen, die nicht an der *London Metal Exchange* (LME) gehandelt werden, wozu auch Indium zählt. Dennoch ist die Datenlage bezüglich des Indiums als relativ schlecht einzustufen. Zwar stieg nach dem Jahr 2000 die Zahl der Fachartikel zu Indium stark an, nicht jedoch diejenige der Primärquellen. Zeitreihen sind selten, da die Recherchen einiger Artikel sich nur auf ein Stichjahr beschränken.

Die Umweltbelastungen bei der Indiumproduktion sind nur bedingt quantifizierbar, da die Produktionsprozesse relativ neu entwickelt sind und in der öffentlich zugänglichen Fachliteratur wenig diskutiert werden, insbesondere hinsichtlich der eingesetzten Stoffmengen. In der Praxis wird eine Vielzahl von verschiedenen Verfahren zur Produktion von Indium eingesetzt, doch nur einzelne davon werden in der Fachliteratur vorgestellt und diskutiert, teils missverständlich und unklar²⁹.

In der ecoinvent-Datenbank, die zur Beschreibung der Primärproduktion herangezogen

²⁸ Man spricht hier von sogenannten *paying metals*, da diese die Recyclingkosten für die Rückgewinnung bestimmter Bauteile abdecken und damit eine rentable Rückgewinnung mehrerer im Bauteil enthaltener Metalle erlauben.

²⁹ Aufgrund der vorliegenden Referenzlisten wird vermutet, dass die japanischsprachige Fachliteratur zusätzliches Wissen bereitstellen könnte. Eine Auswertung japanischsprachiger Fachliteratur ist hier nicht möglich gewesen.

wurde, wird die Umweltbelastung der Indiumraffination mangels spezifischer Prozesskenntnisse überwiegend von derjenigen der Kupferproduktion abgeleitet (Classen / Scharnhorst 2009). Eine Bewertung, inwiefern diese Vereinfachung zutreffend ist, war aufgrund der verfügbaren Daten nicht möglich.

III.4. Danksagung

Für kritische Durchsicht und punktuelle Ergänzungen wird Dr. Christian Hagelüken, Umicore Precious Metals Refining, gedankt.

III.5. Referenzen

- Alfantazi, A. M. / Moskalyk, R. R. (2003): Processing of indium: a review. *Minerals Engineering*, Vol. 16, 687-694
- Angerer, G. / Marscheider-Weidemann, F. / Lüllmann, A. / Erdmann, L. / Scharp, M. / Handke, V. / Marwede, M. (2009): Rohstoffe für Zukunftstechnologien. Schlussbericht vom 02.02.2009, Studie des Fraunhofer Instituts für System- und Innovationsforschung (ISI) und des Instituts für Zukunftsstudien und Technologiebewertung (IZT)
- Aritake, T. (2008): Japanese Ministries Seek Recycling Mandate for Flat-Panel Televisions. *Asia and the Pacific*, Vol. 31, Nr. 21, 950
- Asian Metal (2008): 2007 Annual Report on Chinese Indium Market. Asian Metal Ltd; http://www.asianmetal.com/report/en/2007In_en.pdf (26.02.2011)
- BGR [Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe] (2008): Indium – ein Rohstoff der Hochtechnologie. Beitrag zum Projekt: Indium – Metallogenetische und lagerstättenkundliche Stellung in Massivsulfidlagerstätten Kanadas, Südafrikas und Chinas; http://www.bgr.bund.de/nr_326194/DE/Themen/Min_rohstoffe/Projekte/Fachbeitraege/FB__Indium/Indium.html (15.07.2008), neu auf http://www.bgr.bund.de/DE/Themen/Min_rohstoffe/Projekte/Rohstoff-Forschung-abgeschlossen/Indium.html
- Bilow, U. / Reller, A. (2009): Engpässe bei Hightech-Metallen. *Nachrichten aus der Chemie*, Vol. 57, Nr. 6, 647-651
- Bringezu, S. (2000): Ressourcennutzung in Wirtschaftsräumen: Stoffstromanalysen für eine nachhaltige Entwicklung; Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag
- Bublies, T. (2006): Ressourcengeographie des Metalls Indium. Raum-zeitliche Verflechtungen und Stoffströme. *Geographica Augustana*, Band 1, Institut für Geographie, Universität Augsburg, 59 Seiten
- Buchert, M. / Schüler, D. / Bleher, D. (2009): Critical Metals for Future Sustainable Technologies and Their Recycling Potential. UNEP DTIE Report, Sustainable Innovation and Technology Transfer Industrial Sector Studies; <http://www.unep.fr/shared/publications/pdf/DTIx1202xPA-Critical%20Metals%20and%20their%20Recycling%20Potential.pdf> (24.07.2011)
- Burns, S. (2008): Computer mit Metallkühlung; <http://www.heise.de/tr/artikel/62256> (14.07.2008)
- Chegrouche, S. / Bansmaili, A. / Kadri, B. (2001): Recovery of Gallium, Germanium and Indium from Algerian Zinc Residues. *Entropie*, Vol. 37, Nr. 233, 58-61

- Classen, M. / Scharnhorst, W. (2009): Lead, Zinc and the Co-Products Cadmium and Indium. Final report of updated Swiss National Life Cycle Inventory Database Ecoinvent. Empa, Swiss Centre for Life Cycle Inventories; Dübendorf, Switzerland
- Greinacher, E. (1987): Gewinnung von Sondermetallen und ihre Anwendungen in Optik, Elektronik und Kommunikation. *Erzmetall*, Vol. 40, Nr. 2, 65-70
- Hagelüken, C. / Meskers, C. E. M. (2010): Complex Life Cycles of Precious and Special Metals; in: Graedel, T. E. / van der Voet, E. (Ed.): Linkages of Sustainability. From the Strüngmann Forum Report. MIT Press, 163-197
- Hagelüken, C. (2011): Anwendungen von Indium. Persönliche Mitteilung: E-Mail vom 31.05.2011, Umicore
- IFA [Institut für Arbeitsschutz der Deutschen Gesetzlichen Unfallversicherung] (2009): GESTIS-Stoffdatenbank: Indium / International Chemical SafetyCards (ICSC); www.dguv.de/ifa/stoffdatenbank (11.01.2010)
- Jakhanwal, V. (2010): Mobile Handsets Displays Market Tracker. iSuppli, Small/Medium Displays; http://www.isuppli.com/Abstract/P11943_20100809142432.pdf (27.02.2011)
- Jorgenson, J. D. / George, M. W. (2005): Mineral Commodity Profile: Indium. Open-File Report 2004-1300, U. S. Geological Survey, Reston, Virginia
- Kawaguchi, Y. (2008): Recyceltes Home Cinema. *Wissenschaft und Technik*, Vol. 9, 46-49
- Kawamoto, H. (2008): Japan's Policies to be adapted on Rare Metal Resources. *Quarterly Review*, Vol. 27, 57-76
- Meskers, C. E. M. / Vandenbroeck, K. / Vliegen, J. / De Ruijter, I. / Dalle, T. / Rigby, P. (2010): Recycling Technologies to Close the Loop for PV Materials; in: Proceedings 25th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition / 5th World Conference on Photovoltaic Energy Conversion, Valencia: 3683–3687
- Mikolajczak, C. (2009): Availability of Indium and Gallium. Soldering White Papers, Indium Corporation; <http://www.indium.com/techlibrary/whitepapers/availability-of-indium-and-gallium> (25.10.2010)
- Mc Mulloch, R. (2000): Indium displays a bright future. *Metal Bulletin Monthly: world steel and metal news*
- Niederschlag, E. / Stelter, M. (2009): 145 Jahre Indium – Ein Metall mit Zukunft? *Erzmetall*, Vol. 62, Nr. 1
- Noël, F. (1989): Indium and Indium Compounds; in: Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry, Vol. A 14, 5th, completely revised edition; Weinheim, Basel, Cambridge, New York: 157-166

- NRC [National Research Council] (2008): Minerals, Critical Minerals, and the U.S. Economy. National Research Council of the National Academies, Division on Earth and Life Studies, Board on Earth Sciences and Resources, Committee on Critical Mineral Impacts on the U. S. Economy and Committee on Earth Resources; Washington, D.C.: The National Academies Press
- Pohl, W. L. (2005): Mineralische und Energie-Rohstoffe. Eine Einführung zur Entstehung und nachhaltigen Nutzung von Lagerstätten. W. und W. E. Petrascheck's Lagerstättenlehre, 5. Auflage; Stuttgart: E. Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung, 527 Seiten
- ProBas [Prozessorientierte Basisdaten für Umweltmanagement-Instrumente] (2010): Datenbankabfrage der Datenbank ProBas;
<http://www.probas.umweltbundesamt.de/php/index.php> (Dezember 2010)
- Reller, A. / Bublies, T. / Staudinger, T. / Oswald, I. / Meißner, S. / Allen, M. (2009): The Mobile Phone: Powerful Communicator and Potential Metal Dissipator. *Gaia*, Vol. 18, Nr. 2, 127-135
- Rüth, E. (2009): Die Nullnummer. Indium ist wertvoll, unverzichtbar und knapp. In Deutschland wird es nicht recycelt. Warum? *Recycling Magazin*, Vol. 64, Nr. 10, 28-29
- Rüth, M. (2010): Über Bedarf und Beschaffung von Gallium, Indium, Germanium und Tellur. Vortrag an der Euroforum-Konferenz Technologiemetalle, Frankfurt, 21.-22.09.2010
- Sander, K. (2009): Wertvolle Rohstoffbasis. Durch Rücknahme- und Verwertungssysteme der Hersteller von Photovoltaik-Modulen können ökologische und ökonomische Vorteile erzielt werden. *Müllmagazin*, Vol. 1, 23-29
- Schön, S. (2009): Wertvolles Metall für die Chip-Industrie im Erzgebirge entdeckt. *sz-online/Sächsische Zeitung* (12.01.2009)
- Schwarz-Schampera U. / Herzig P. M. (2002): Indium. Geology, Mineralogy and Economics; Heidelberg: Springer-Verlag, 257 Seiten
- Tolcin, A. C. (2008): Mineral Commodity Summaries: Indium (January 2008). U. S. Geological Survey
- Tolcin, A. C. (2009): Minerals Yearbook 2008: Indium [Advance Release] (December 2009). U. S. Geological Survey
- van den Broeck, K. (2009): Exploring the challenges in closing the loop for special metals. Umicore Precious Metals Refining. Presentation at the Metal Pages International Minor Metals Conference 2010, Xiamen, 19.-21.10.2010

- Vulcan, T. (2009): Indium: No Screen Test Needed. Hard Assets Investor – Common Sense on Commodities;
<http://www.hardassetsinvestor.com/component/content/article/1915.html>
(27.02.2011)
- Wiese, U. (1981): Der Reinstoff Indium – Erzeugung und Anwendung. *Erzmetall*, Vol. 34, Nr. 4, 190-196
- Ziemann, S. / Wittmer, D. / Schebek, L. (2010): An empirical approach to structure the uncertainties of selected metal reserves; in: Martens P. N. (Ed.): Mineral Resources and Mine Development. Drittes Internationales Kolloquium, RWTH Aachen, 26.-27.05.2010. 1. Auflage; Essen: VGE Verlag

IV. Mangan

Christoph Lauwigi und Christoph Dressler,
Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg

IV.1. Einleitung

IV.1.1. Relevanz

Mangan weist eine hohe Umweltrelevanz auf. Da es außerdem ein wichtiges Legierungsmetall bei der Stahlherstellung ist, wurde es als eines der zehn Metalle für eine vertiefende Betrachtung ausgewählt.

Die Bedeutung von Mangan liegt darin begründet, dass es aufgrund seiner Eigenschaften in seinen Haupteinsatzgebieten nicht zufriedenstellend durch einen Ersatzstoff substituiert werden kann. In der Stahlproduktion, die den größten Teil des weltweiten Verbrauchs ausmacht, erhöht Mangan die Festigkeit des Stahls, ohne die Elastizität relevant zu verringern. Zudem wirkt es sich zum Beispiel günstig auf die Schmiedbarkeit aus, vergrößert die Einhärtetiefe und erhöht die Korrosionsbeständigkeit.

IV.1.2. Charakteristika

Bezogen auf die Erdkruste ist Mangan ein relativ häufiges Element, das nicht gediegen, sondern lediglich in Form verschiedener Mineralien vorkommt und in seinen natürlichen Vorkommen unregelmäßig geografisch verteilt ist. Mangan ist ein grauweißes, hartes und sehr sprödes Metall, das in einigen Eigenschaften dem Eisen ähnlich ist und wegen seiner hohen Affinität zu Schwefel und Sauerstoff sowie seiner werkstoffverbessernden Eigenschaften, vor allem in der metallurgischen Industrie genutzt wird. Mit ca. 85-90 % wird der Großteil des weltweit produzierten Mangans bei der Stahlherstellung verwendet (Corathers 2006). Hier findet Mangan in fast allen Stahlsorten Verwendung. Deutlich kleinere Mengen kommen als Legierungen für Nichteisenmetalle, als chemische Verbindung als Katalysator oder in Batterien zum Einsatz.

Der TMR (Globaler Materialaufwand, engl.: *Total Material Requirement*) von Mangan wurde bisher noch nicht detailliert untersucht, erste Abschätzungen hatten einen Wert um 13 t/t Mangan ergeben (Bringezu 2000). In einer eingehenden Untersuchung wurde der TMR zu 16,7 t/t Ferromangan bestimmt (Wuppertal Institut 2003).

Eine regelmäßige Aufnahme metallischem Mangans über die Atemwege (z.B. über Staub oder Dentallegierungen) ist toxisch und kann von Hirn- und Nervenschäden bis zum sogenannten Manganismus (motorische Störungen ähnlich dem Morbus Parkinson), Schäden des blutbildenden Systems und Anämien führen. Der Kontakt mit Permanganat kann zu Verätzungen führen. Gebundenes Mangan ist als Spurenelement und wichtiger Bestandteil vieler Enzyme auch für Lebewesen von großer Bedeutung. Ein Schadenspotential in der Umwelt wurde bislang nicht festgestellt (ATSDR 2008).

Als Legierungsmetall für Stahl erhöht es dessen Schmiedbarkeit, Festigkeit und Verschleißwiderstand, verringert allerdings dabei leicht die Schweißbarkeit. Als Legierungsmetall erhöht es auch in Kupfer- und Aluminiumlegierungen die Festigkeit und die Korrosionsbeständigkeit (IMnI 2009). Aufgrund der bereits geschilderten Hauptverarbeitungsbereiche ist die weltweite Nachfrage für Mangan weitestgehend an den Bedarf der Stahlindustrie gekoppelt. Dementsprechend ist sowohl die Preisentwicklung, als auch die Menge der Förderung stark von dem Zusammenspiel zwischen der fördernden und der verarbeitenden Industrie abhängig. Der Zusammenhang zwischen fördernder und verarbeitender Industrie wird dadurch unterstrichen, dass sich der weltweite Eisen- und Stahlverbrauch durch den beschleunigten Industrialisierungsprozeß der Schwellenländer wie China und Indien dynamisch entwickelt hat.

IV.1.3. Anwendungsbereiche

Mangan wird vor allem in der Stahlherstellung eingesetzt. Hier wird es einerseits als Legierungsbestandteil, andererseits als Desoxidations- und Entschwefelungsmittel zur Erhöhung der Stahlqualität eingesetzt. Ebenfalls findet Mangan Einsatz in Legierungen von Nichteisenmetallen wie Kupfer und Aluminium. Die chemische Industrie verwendet Manganoxid als Oxidationsmittel, als Katalysator und zur Farbherstellung.

IV.2. Umweltbelastungen und Materialverluste

IV.2.1. Abbau

Im Jahr 2007 wurden weltweit 12,8 Mio. t (Mt) Mangan in Form von Manganerzen gefördert (IMnI 2009).

Nach Wellbeloved et al. (2005) werden entsprechend dem Einsatz in den drei wichtigsten Einsatzgebieten – das sind Eisen- und Stahlindustrie, chemische Industrie und Herstellung von Trockenbatterien – drei Erztypen unterschieden:

- metallurgische Erze,
- Erze chemischer Qualität,
- Erze von Batteriequalität.

Metallurgische Erze enthalten 38-55 % Mangan (für die Preisgestaltung wird ein Industriestandard von 48 % angenommen). Der Mangangehalt der Erze chemischer Qualität variiert je nach Anwendungsbereich und Gebrauch des Endprodukts. Erze von Batteriequalität enthalten gegenüber den metallurgischen Erzen vorwiegend das bei der Batterieherstellung benötigte Mangandioxid (MnO_2) (70-85 % Mangan); sie können daher nach Klassierung, Reinigung und Mahlen direkt zur Herstellung von Batterien eingesetzt werden.

Ferner werden Erze mit geringerem Mangangehalt abgebaut, welche als „eisenhaltiges Manganerz“ und „manganhaltiges Eisenerz“ (10-38 % bzw. 5-10 % Mangan) bezeichnet werden. Zur Abbaumenge dieser Erze liegen jedoch keine Angaben vor. Einen Überblick über die Vielfalt der zur Gewinnung von Mangan bzw. seinen Verbindungen verwendeten Mineralien gibt Tab. Abb. IV-1 IV-1.

Tab. IV-1: Mineralien zur Mangangewinnung

Mineral	Verhältnisformel	Mangangehalt (%)
Bementit	$\text{Mn}_3\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$	43
Bixbyit	$(\text{Mn}, \text{Fe})_2\text{O}_3$	34-40
Braunit	$\text{Mn}^{2+}\text{Mn}_6^{3+}\text{SiO}_{12}$	67
Cryptomelane	$\text{KMn}_8\text{O}_{16}$	62
Hausmanit	Mn_2MnO_4	73
Jacobsit	Fe_2MnO_4	24
Manganit	$\gamma\text{-MnOOH}$	62
Psilomelane	$(\text{Ba}, \text{Mn}^{2+})_3(\text{O}, \text{OH})_6\text{Mn}_8\text{O}_{16}$	45-60
Pyrolusit	$\beta\text{-MnO}_2$	63
Rhodochrosit	MnCO_3	48
Rhodonit	$(\text{Mn}, \text{Fe}, \text{Ca})\text{SiO}_3$	42

Quelle: Wellbeloved et al. (2005)

Umweltbelastungen und Materialverluste

Die führenden Förderunternehmen hinsichtlich Mangan bauen die Manganerze sowohl im Tagebau, als auch im Untertagebau ab (Verhältnis ca. 70:30) (Adelhardt / Saiger 1999). Beispielsweise baut BHP Billiton (früher: Samancor) In Südafrika Manganerz in der Tagebauminen Mamatwan und in der unterirdisch liegenden Wessels-Mine ab, wo das Erzvorkommen von einer im Durchschnitt 45 m mächtigen Gesteinsschicht überlagert wird. In beiden Fällen wird das Erz gesprengt, verladen und dann in Brechwerke gebracht (Samancor 2009).

Wird Mangan im Tagebau abgebaut, dann wird hauptsächlich das sogenannte Stripmining-Verfahren mit Bohr- und Sprengarbeiten angewandt. Die spezifische Ausführung des Verfahrens richtet sich nach der Härte des Gesteins: Ist das Erz weich genug, dann wird es ohne vorherige Auflockerung direkt verladen; der Abraum wird mit Baggern abgeräumt. Bei härteren Gesteinen (z.B. Kalkstein) werden vor dem Verladevorgang Auflockerungssprengungen durchgeführt (Adelhardt / Saiger 1999). Vor allem bei großflächigem und langjährigem Betrieb der Minen gehen damit einschneidende Landschaftsveränderungen einher: Um die zu fördernden Manganerze bergbautechnisch zu erreichen, kann z. B. eine Grundwasserabsenkung stattfinden, die sich nicht nur auf das unmittelbare Abbaugelände, sondern auch auf die angrenzenden Gebiete und die darin beheimateten Ökosysteme auswirkt.

Bei der Gewinnung der Erze im Untertagebau ist das Nebengestein meist relativ stabil und muss nicht oder nur wenig gestützt werden. Aufgrund der Anwendung des Örtbergbaus ist der Manganverlust bei der Gewinnung mit ca. 25 % trotzdem vergleichsweise hoch (Adelhardt / Saiger 1999). Bei diesem Verfahren werden zwischen den Abbauräumen (ca. 6 m breit) Pfeiler (ca. 11 m breit), sogenannte Örter, stehen gelassen, um die Oberfläche des Untertagebaus gegen Absenkung abzusichern. Zwar ist grundsätzlich durch ein geeignetes Rückbauverfahren ungefähr eine Halbierung der Manganverluste (auf ca. 13 %) beim Abbau möglich, indem durch die Örter weitere Abbauräume (ca. 6 m breit) getrieben werden, doch mangels praktischer Umsetzung dieser Maßnahme wird von einem Manganverlust von 25 % ausgegangen (Adelhardt / Saiger 1999).

Die Gewinnung von Mangan aus sogenannten Manganknollen aus der Tiefsee ist ein seit Langem diskutiertes Thema. Obwohl der Abbau dieser Knollen bisher nicht als wirtschaftlich eingestuft wird, erwarb Deutschland dennoch im Jahr 2006 das Explorationsrecht für ein Tiefseegebiet, in dem ein entsprechender Abbau möglich wäre (siehe Box 1).

Für die Materialverluste im Tagebau liegen lediglich ungenaue Schätzungen vor: Kennedy (1990) schätzt die Materialverluste je nach Erz- und Lagerstättentyp auf 10 % bis 60 %. Da Manganerzlagerstätten überwiegend störungsfrei ausgebildet und im erschlossenen Tagebau auch entsprechend gut zugänglich sind, wird der Materialverlust hier auf 10 % geschätzt. Im Untertagebau ist von einem Abbauverlust von ca. 25 % auszugehen. Aufgrund des Verhältnisses von Tagebau zu Untertagebau bei der Manganerzförderung (70:30), wird der für die Gesamtförderung resultierende Materialverlust auf 15 % geschätzt.

Bei der Gewinnung von Mangan im Tagebau können einschneidende Landschaftsveränderungen auftreten. Daneben kann die Absenkung des Grundwassers die umliegenden Landschaften und die darin beheimateten Ökosysteme beeinflussen. Der Flächenverbrauch bei der Gewinnung ist verglichen mit demjenigen von Zinn deutlich geringer. Eine Übersicht über ausgewählte Umweltbelastungen der Gewinnung der Zinkerze lässt sich den Umweltprofilen entnehmen (Giegrich / Liebich 2008). Um Vergleichbarkeit mit anderen untersuchten Metallen und eine Konzentration auf die zu erwartenden Kernprobleme zu gewährleisten, wurde die Betrachtung auf den Treibhauseffekt, die Versauerung, die terrestrische Eutrophierung, den Flächenverbrauch und den kumulierten Rohstoffaufwand (KRA) begrenzt; quantitative Angaben hierzu sind in Tab. IV-2 dargestellt; mangels detaillierter Angaben zu den Umweltbelastungen bei der Mangangewinnung werden die Gewinnung und die Aufarbeitung zusammengefasst in Kap. IV.2.2 beschrieben.

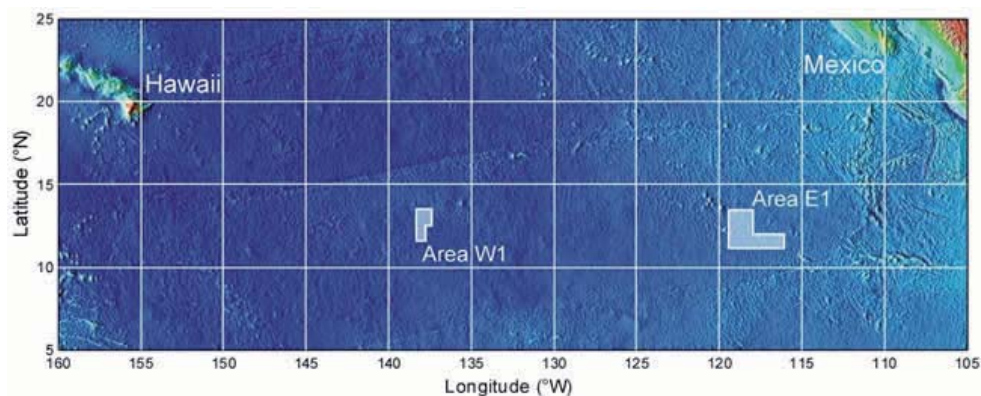
Box 1: Manganknollen

Bereits vor ca. 30 Jahren wurden polymetallische Knollen – wegen ihres hohen Mangangehaltes auch „Manganknollen“ genannt – in der Tiefsee entdeckt und untersucht. Sie entstehen durch „Biomineralisation“, das ist ein Prozess, bei dem durch Algen oder Bakterien eine im Wasser gelöste Substanz zum Mineral ausfällt. Im Fall von Manganknollen ist dies ein Bakterium, dessen äußere Zellschicht eine solche Ausfällung vollzieht (Wang / Müller 2009). Diese polymetallischen Knollen haben einen Mangangehalt von 27 %, werden aber vor allem wegen ihrer Gehalte an Kupfer, Nickel und Kobalt von insgesamt bis zu 3 % prospektiert.

Die Gewinnung und ihre Methoden sind bereits im Ansatz durch die Internationale Meeresbodenbehörde der Vereinten Nationen geregelt, um dabei auftretende Umweltauswirkungen so gering wie möglich zu halten (ISA 2010). Die damit einhergehenden Umweltbelastungen hinsichtlich des Ökosystems der Tiefsee werden weiterhin erforscht, wobei sich bereits jetzt weitreichende Belastungen abzeichnen. Das durch die Gewinnung der Knollen mit geförderte, feinkörnige Sediment kann – wenn es aufgewirbelt wird – erhebliche Auswirkungen auf die Sauerstoffversorgung des Planktons haben.

Im Jahr 2006 sicherte sich Deutschland Lizenzen von der Internationalen Meeresgrundbehörde der Vereinten Nationen zur Exploration von zwei Gebieten, sogenannten *claims* (Abb. IV-1). Eines der Gebiete ist zur eventuellen Förderung freigegeben, das andere ist der Weltgemeinschaft als Reserve vorbehalten.

Abb. IV-1: Lage der Gebiete zur Exploration polymetallischer Knollen, für die Deutschland Lizenzen zur Erforschung des Abbaus erwarb



Quelle: BGR (2006)

Obwohl ein solcher Abbau zurzeit nicht als wirtschaftlich angesehen wird, wird dennoch angesichts der Mengen an Wertmetallen in den Knollen die Forschung zum Abbau der Knollen vorangetrieben (BGR 2006).

IV.2.2. Aufbereitung

Die Aufbereitung der gewonnenen Erze besteht in der Regel aus Zerkleinern, Sortieren, Läutern und Klassieren des Erzes. Bei dieser relativ einfachen Aufbereitung erhöht sich der Mangangehalt im Konzentrat um nur 1-3 % gegenüber dem Manganerz (Adelhardt / Saiger 1999).

Umweltbelastungen und Materialverluste

Auf Basis der ausgewerteten Fachliteratur sind die Umweltbelastungen bei der Aufbereitung der gewonnenen manganhaltigen Erze wesentlich durch den für die Verfahrensschritte erforderlichen Energieaufwand bestimmt.

Es ist je nach Methodik, Anspruch und Manganpreis¹ von einem deutlichen Materialverlust auszugehen. Nach Adelhardt und Saiger (1999) treten vor allem im Feinkornbereich (< 1,5 mm) sehr hohe Manganverluste mit 30-40 % auf (bezogen auf das in den gewonnenen Erzen enthaltene Mangan). Diese sind vor allem durch die Art der Klassierung bedingt und könnten durch gravimetrische Sortierung und Flotation mit geringfügig erhöhtem Energieaufwand gesenkt werden (Adelhardt / Saiger 1999). In Übereinstimmung zu Adelhardt und Saiger (1999) geben Classen und Althaus (2007) die Manganverluste während der Aufbereitung zu 31 % an. Dies entspricht – bezogen auf die in Kap. IV.2.1 erwähnten 12,8 Mt – einem weltweiten Manganverlust von 4,0 Mt.

Tab. IV-2: Umweltbelastungen und jährliche Materialverluste beim Abbau und der Aufbereitung von manganhaltigen Erzen

Prozess	Umweltbelastung	Materialverluste
Abbau und Aufbereitung von manganhaltigen Erzen	Treibhauseffekt: 12,1 kg CO ₂ -Äq./t Versauerung: 0,246 kg SO ₂ -Äq./t Terrestrische Eutrophierung: 0,0419 kg PO ₄ -Äq./t Kumulierter Rohstoffaufwand: 4,35 t/t Flächenverbrauch: 0,172 m ² /t	4,0 Mt

Quelle: ProBas (2010)

¹ Um die Materialverluste zu verringern, müssten die Feinerze vor der Verhüttung agglomeriert werden; die Betriebe sehen jedoch bisher keine Notwendigkeit, Feinerze überhaupt zu verarbeiten. Dennoch werden sie in einigen Fällen für eine mögliche spätere Nutzung bereits getrennt aufgehaldet (Adelhardt / Saiger 1999).

IV.2.3. Verarbeitung

Auf Basis der in Kap. IV.2.2 dargestellten Erztypen werden verschiedene Halbwaren hergestellt. Ausgehend davon lassen sich folgende Verarbeitungswege unterscheiden:

Ferrolegierungen

Manganerzkonzentrate aus metallurgischen Erzen (siehe Kap. IV.2.2) werden über Elektrolichtbogenöfen zu *Ferromangan* weiterverarbeitet. Bei diesem Verfahren wird durch Starkstrom Hitze erzeugt, welche das Manganerzkonzentrat aufschmilzt. Die hierbei entstehenden Vorlegierungen können direkt in der Stahlindustrie weiterverarbeitet werden. Da Mangan eine starke Bindungsaffinität zu Sauerstoff und Schwefel besitzt, wird durch den Zusatz geeigneter Schlackebildner wie Kalzium-, Silizium- und Aluminiumoxide der Mangangehalt in der Schlacke geregelt. Dabei gilt: Je basischer die Schlacke ist, desto höher ist der Mangangehalt der Schlacke.

Ferrosilicomangan ist eine weitere bedeutende Vorlegierung, die ebenfalls im Elektrolichtbogenofen hergestellt wird. Bei der Herstellung von Ferrosilicomangan wird dem Konzentrat Quarzit zugefügt, um den Siliziumgehalt der Vorlegierung zu erhöhen.

Bei der Herstellung von Ferromangan mit einem typischen Mangangehalt von 78 % beträgt der Mangangehalt in der Schlacke fast 30 %. Diese Schlacke wird zur wieder zur Mangangewinnung genutzt², jedoch sind keine Mengenangaben zum Schlackeaufkommen verfügbar (Wellbeloved et al. 2005).

Metallisches Mangan und Manganlegierungen

Metallisches Mangan kann heute auf zwei Arten hergestellt werden, über elektrolitische (A) und elektrothermische (B) Verfahren:

- A) Bei der elektrolitischen Herstellung werden Konzentrate von Manganerzen chemischer Qualität in einem ersten Schritt reduzierend geröstet, um dann mit Hilfe von Salzsäure als Ion in Lösung zugehen. Diese Lösung wird anschließend elektrolitisch getrennt.
- B) Bei der Herstellung von metallischem Mangan über den elektrothermischen Prozess werden Konzentrate von Manganerzen im Elektrolichtbogenofen mit einer geringen Menge Reduktionsmittel geschmolzen. Durch Zugabe basischer Zuschlagstoffe entsteht zum einen Ferromangan mit einem relativ geringen Mangangehalt; zum andern entsteht eine sehr manganhaltige Schlacke, aus welcher durch Reduktion Mangan gewonnen wird. Sowohl das Ferromangan, als auch die manganhaltige Schlacke finden Einsatz in den darauffolgenden Reduktionsschritten (Wellbeloved et al. 2005).

² Es handelt sich gegenüber dem unter B (weiter unten) beschriebenen Prozess um eine identische Prozeßabfolge mit veränderten Zuschlagsstoffen.

Die weltweite Produktion von Manganvorlegierungen lag im Jahr 2007 bei ca. 13,3 Mt, bestehend aus folgenden Anteilen (IMnI 2009, Wellbeloved et al. 2005):

- 7,7 Mt Siliziummanganlegierungen mit einem Mangangehalt von ca. 76 %,
- 4,5 Mt Ferromanganlegierungen mit hohem Kohlenstoffanteil und einem Mangangehalt von ca. 78 % und
- 1,1 Mt Ferromanganlegierungen mit mittlerem oder geringem Kohlenstoffanteil und einem Mangangehalt von ca. 80 %.

Weiterverarbeitung des metallischen Mangans

Je nach Endanwendung wird das metallische Mangan in verschiedenen Formen und Größen weiterverarbeitet. Im Allgemeinen benötigt die Stahlindustrie gröberes Material als die Aluminiumindustrie. Hersteller von manganhaltigen Chemikalien benutzen meist pulverförmiges Mangan (Wellbeloved et al. 2005).

Umweltbelastungen und Materialverluste

Die Verarbeitung des Manganerzkonzentrates zu metallischem Mangan³ ist mit spezifischen Umweltbelastungen verbunden. Aus Gründen der Vergleichbarkeit mit anderen Metallen wurde bei der Betrachtung der Daten auf ausgesuchte Indikatoren geachtet. Der Treibhauseffekt, die Versauerung, die terrestrische Eutrophierung, der kumulierte Rohstoffaufwand und der Flächenverbrauch wurden berücksichtigt (Tab. IV-3). Da in der Datenbank ProBas, eine vom Umweltbundesamt angebotene Bibliothek für Lebenszyklusdaten, der komplette Lebensweg betrachtet wird (ProBas 2010), wurde hier eine Allokation auf Basis der Daten der ecoinvent-Datenbank durchgeführt, welche den Lebensweg vom Erzkonzentrat hin zum metallischen Mangan betrachtet (Classen / Althaus 2007).

Da der Großteil des Manganverlustes in diesem Prozess durch Verluste in die manganarme Schlacke bedingt ist, lässt sich hier eine grobe Abschätzung durchführen: Bei Schlacken hängt die Menge des Mangan-Verlustes entscheidend von dem Schlackenbasizitätsgrad und der Schlackenmenge ab. Der relative Mangan-Verlust liegt im Allgemeinen im Bereich 10-30 %. Es wird daher der relative Mangan-Verlust bei der Verarbeitung durch Bildung des Durchschnitts auf 20 % geschätzt (Adelhardt / Saiger 1999). Laut Kap. IV.2.1 wurden im Jahr 2007 8,8 Mt Mangan verarbeitet. Demnach beträgt der weltweite Mangan-Verlust an dieser Stelle ca. 1,8 Mt Mangan.

³ Es liegen keine entsprechenden Angaben zu Manganvorlegierungen vor.

Adelhardt und Saiger (1999) gehen in der metallurgischen Verarbeitung (Anteil an der gesamten Verarbeitung ca. 90 %) von einem durchschnittlichen Energiebedarf von 52 Gigajoule pro Tonne Mangan aus, was unter Annahme der oben genannten weltweiten Produktionsmengen einem jährlichen Energieverbrauch von ca. 380 Petajoule (ca. 105 TWh) bedeutet (dies entspricht ca. 17 % des in Deutschland im Jahr 2007 verbrauchten Bruttostroms).

Tab. IV-3: Umweltbelastungen und jährliche Materialverluste bei der Produktion von metallischem Mangan aus Konzentraten

Produkt	Umweltbelastung	Materialverluste
Metallisches Mangan	Treibhauseffekt: 2.490 kg CO ₂ -Äq./t Versauerung: 15,81 kg SO ₂ -Äq./t Terrestrische Eutrophierung: 1,80 kg PO ₄ -Äq./t Kum. Rohstoffaufwand: 5,94 t/t Flächenverbrauch: 0,49 m ² /t toxische Stäube	1,8 Mt

Quelle: ProBas (2010), modifiziert nach Classen und Althaus (2007)

IV.2.4. Produktion manganhaltiger Produkte und andere Produktion

Ein Großteil der Mangan-Halbzeuge wird bei der Stahlherstellung eingesetzt, einerseits als Legierungselement (6,5 Mt im Jahr 2007), andererseits als Desoxidations- und Entschwefelungsmittel. Beide Bereiche machen zusammen mehr als 90 % des Gesamtbedarfs an Mangan aus. Die für diese beiden Anwendungsbereiche eingesetzte Menge an Mangan teilt sich ungefähr im Verhältnis 2:1 auf (Tab. IV-4).

Bei der Stahlherstellung treten teils Sauerstoff- und Schwefelgehalte auf, welche negative Auswirkungen auf die Stabilität des Stahls hätten; durch Zusatz von metallischem Mangan werden Sauerstoff und Schwefel an das Mangan gebunden und somit dem Stahl entzogen.

Der Einsatz von Mangan in Kupfer- und Aluminiumlegierungen beträgt jährlich ca. 200.000 t (IMnI 2009) (Tab. IV-4).

Tab. IV-4: Verteilung des weltweiten Einsatzes von Mangan zur Produktion manganhaltiger Produkte und als Zusatz zur Produktion anderer Produkte im Jahr 2007

Anwendungsbereich	Einsatz2007 [Mt]	Anteil [%]
Stahllegierungen	6,5	64
Stahlherstellung (Hilfsmittel)	2,8	27
Batterien	0,4	4
Produkte der Chemischen Industrie (Manganverbindungen)	0,3	3
Kupfer-/Aluminiumlegierungen	0,2	2
Total	10,2	100

Quelle: IMnI (2009), Wellbeloved et al. (2005)

Umweltbelastungen und Materialverluste

Im Rahmen der Produktion manganhaltiger Produkte treten sowohl Umweltbelastungen (z.B. durch den Energieaufwand zur Stahlerzeugung), als auch Materialverluste auf. Die Umweltbelastungen bei der Stahlerzeugung sind nicht manganspezifisch und werden daher nicht näher betrachtet.

Die Umweltbelastungen während der Produktion manganhaltiger Chemikalien sind sehr unterschiedlich, da produktspezifisch. Da das im Anwendungsfeld „manganhaltige Chemikalien“ eingesetzte Mangan lediglich ca. 3 % der weltweit im Jahr 2007 in die Nutzungsphase eingebrachten Manganmenge ausmacht (Tab. IV-4), wird hier keine detailliertere Betrachtung der Umweltbelastung durchgeführt. Dies gilt analog für die Umweltbelastungen bei der Produktion manganhaltiger Batterien, da das eingesetzte Mangan hier lediglich 4 % der weltweit im Jahr 2007 in die Nutzungsphase eingebrachten Menge an Mangan ausmacht.

Manganverluste bei der Herstellung manganhaltiger Stähle treten durch Verluste in die Schlacke auf. Der Schlackenanteil bei der Stahlherstellung beträgt ca. 10 % des produzierten Stahls (EC 2001). Diese Schlacken enthalten durchschnittlich ca. 4 % Mangan (ABW 2003). Somit ergeben sich bei der Stahlherstellung Manganverluste von ca. 40.800 t. Auch wenn diese Schlacken teilweise genutzt werden, handelt es sich hinsichtlich des Mangans um dissipative Verluste: Derartige Stahlwerksschlacken werden zu 68 % in der Bauindustrie eingesetzt (FeHS 2008), zu 11 % deponiert, zu 11 % als Kreislaufstoff geführt, zu 8 % in Dünger eingebracht und zu 2 % in Zwischenlager verbracht (FeHS 2008). Da bei diesen Verwendungen bzw. der Deponierung das enthaltene Mangan nicht zurückgewonnen wird, wird dies als Manganverlust angesehen. Angaben zu Manganverlusten bei den Verfahren zur

Produktion manganhaltiger Chemikalien und Batterien waren der vorliegenden Fachliteratur nicht zu entnehmen.

Bei der Herstellung von Edelstählen geht das Mangan verloren, das als Hilfsmittel zur Desoxidation und zur Entschwefelung der Edelstähle verwendet wird. Bei einer jährlichen Einsatzmenge an Mangan von 2,8 Mt als Hilfsmittel zur Stahlherstellung ergibt sich hier ein Materialverlust von 99.680 t (Tab. IV-5).

Tab. IV-5: Umweltbelastungen und jährliche Materialverluste bei der Produktion manganhaltiger Produkte

Produkt	Umweltbelastung	Materialverluste	Bemerkung
Herstellung manganhaltiger Stählen	nicht bekannt	40.000 t	Unerwünschte Verluste in die Schlacke.
Herstellung von „Edelstählen“		99.800 t	Verlust in Form von Hilfsmitteln zur Desoxidation und Entschwefelung

IV.2.5. Nutzung manganhaltiger Produkte

In Batterien wird Mangan in Form von Mangandioxid verwendet, welches entweder direkt aus Erzen von Batteriequalität (siehe Kap. IV.2.2) oder synthetisch hergestellt wird. Beim Entladen von Primärzellen entsteht elementarer Wasserstoff, welcher mittels Mangandioxid wieder zu Wasser oxidiert wird.

In der chemischen Industrie wird Mangan in den folgenden Produkttypen eingesetzt:

- Manganverbindungen in mineralischen Farben,
- Manganverbindungen zur Herstellung von Schweißelektroden,
- Kaliumpermanganat als Oxidationsmittel für verschiedene Prozesse,
- Manganoxide als Oxidationsmittel in der Uranerzaufbereitung,
- in Form von „Maneb“, einer organometallischen Verbindung auf Manganbasis (als Fungizid),
- als Manganverbindung in weiteren Anwendungen, meist als Oxidationsmittel oder Katalysator bei bestimmten chemischen Prozessen.

Es liegen keine Angaben zur Verteilung der eingesetzten Mengen an Mangan (jährlich ca. 300.000 t) auf diese verschiedenen Produkttypen vor.

Daneben ist die Zunahme des Lagers durch Produkte zu nennen, die weder recycelt, noch deponiert werden. Die Lagerzunahme des Mangans in der Nutzungsphase

beträgt nach den Annahmen dieser Untersuchung für das Jahr 2007 ca. 8,5 Mt. Manganlegierte Stähle machen hierbei den größten Teil aus.

Umweltbelastungen und Materialverluste

Aufgrund der Eigenschaften von metallischem Mangan und manganhaltiger Legierungen ist von keinen relevanten Umweltbelastungen während der Nutzungsphase auszugehen. Bei der Nutzung von Mangan in Batterien entstehen keine relevanten Emissionen.

In einigen Anwendungsbereichen treten jedoch während der Nutzungsphase durch dissipative Nutzung relevante Materialverluste auf, beispielsweise bei der Verwendung von Manganverbindungen als Fungizid. Mangels Informationen zu einem Recycling des in vielen unterschiedlichen Anwendungen in der chemischen Industrie eingesetzten Mangans (z.B. Einsatz als Katalysator) wird hier vereinfachend davon ausgegangen, dass dieses komplett dissipativ eingesetzt wird und daher als Manganverlust eingestuft.

Der Manganverlust der durch den Einsatz von Mangan in Batterien entsteht ist unklar. Da über die weltweiten Rücknahme- und Recyclingsysteme keine Allgemeinen Informationen vorliegen, sei hier beispielhaft die brasilianische Situation im Jahr 2002 geschildert. Laut Bernandes et al. (2003) werden in Brasilien 1,9 % des erfassten Abfallstromes rezykliert, Batterien befinden sich aber nicht darunter. Somit ist davon auszugehen, dass derzeit der Großteil der weltweit vertriebenen Alkali-Mangan-Batterien nicht dem Recycling zugeführt wird, sondern eher deponiert wird. Eine Ausnahme stellt hier Deutschland dar. Die Situation in Deutschland wird im Kapitel Recycling (Kap. IV.2.6) erläutert.

Tab. IV-6: Jährliche Materialverluste bei der Nutzung manganhaltiger Produkte

Anwendungsbereich	Materialverluste	Bemerkungen
Produkte der Chemischen Industrie (Manganverbindungen)	< 300.000 t	dissipative Verluste
Batterien	400.000 t	Verluste durch nicht rezyklierte Batterien (Hausmüll)
Total	ca. 800.000 t	

IV.2.6. Recycling

Mangan in Stahllegierungen

Für den Stoffhaushalt von Mangan ist vor allem ein indirektes Recycling (im Sinne von nicht auf das Mangan zielend) von Bedeutung; direktes Recycling von metallischem Mangan findet lediglich in vernachlässigbar kleinen Mengen statt.

Eine Rückgewinnung erfolgt:

- in Kombination mit der Rückgewinnung von Stahl/Eisen aus Stahl- und Eisenschrotten,
- in Kombination mit der Rückgewinnung von Eisen aus Stahlschlacken.

Stahl enthält heute einen Mangangehalt von durchschnittlich 0,5 % (Wellbeloved et al. 2005). Das in Stahlschrotten enthaltene Mangan verbleibt beim Recycling im Stahlkreislauf. Es wird beim Stahlrecycling darauf geachtet, den Mangangehalt in der Schmelze so gering wie möglich zu halten. Befindet sich im Stahlschrott eine erhöhte Menge an Mangan, wird dies durch Mischen dieser Schrottcharge mit manganärmeren Chargen kompensiert, damit der Mangangehalt des entstehenden Stahls einen gewissen Wert nicht überschreitet (Fandrich 2010). 80 % des Mangans, welches in ein Elektrostahlwerk gelangt, stammen aus Schrotten, jedoch verlassen nur ca. 20 % des dort eingesetzten Mangans das Stahlwerk in Form von produziertem Stahl; der Rest befindet sich in der Schlacke (Müller / Graedel 2003). Weder die deutsche, noch die europäische Stahlschrottsortenliste, welche als Handelsgrundlagen beim Stahlrecycling dienen, weisen Mangan explizit als Verunreinigung aus. Aufgrund der Manganverluste in die Schlacke hat das Recycling von Stahlschrotten keinen wesentlichen dämpfenden Einfluss auf die Nachfrage nach Mangan (Anglo American 2009).

Schrotte hochlegierter Manganstähle werden teils durch Mischung mit manganärmeren Schrotten in den Stahlkreislauf überführt, teils auch in speziellen Anwendungen eingesetzt, bei denen der Mangangehalt erwünscht ist bzw. nicht stört (z.B. Gegengewichte von Schleusentoren). Eine Rückgewinnung des Mangans aus derartigen Stählen ist die Ausnahme (Lüning 2010).

Quantitative Angaben zur Wiedergewinnung von Mangan durch Recycling manganhaltiger Stähle sind mit der vorliegenden Fachliteratur nicht möglich. Nach Worldsteel (2009) betrug die weltweite Recyclingquote von Stahl im Jahr 2007 ca. 68 %. Mit der Annahme, dass 20 % des im Stahlschrott enthaltenen Mangans in den erzeugten Stahl übergehen, ergibt sich für den Mangananteil im Stahl rechnerisch eine Recyclingquote von 13,6 %. Dies entspricht – bezogen auf die Nutzung in Stahllegierungen im Jahr 2007 – einer Menge von 884.000 t rezyklierten Mangans. Da die Legierungsfunktion des Mangans in den Hintergrund tritt und im Falle des Stahlrecyclings eher der Nutzen als Schlackebildner erwünscht ist, findet hier sogenanntes *Downcycling* statt.

Mangan in Batterien

Batterierecycling erfordert primär entsprechende Sammelinfrastrukturen, die in der Regel national organisiert sind. In Deutschland ist für das Batterierecycling bereits eine bestimmte Sammelquote gesetzlich vorgeschrieben: Das Batteriegesetz⁴ schreibt ab 2012 eine Sammelquote für Batterien von 35 % vor. Laut der Stiftung „Gemeinsames Rücknahmesystem Batterien“ werden bereits heute 43 % der Batterien rezykliert (Fricke / Lührs 2008). Deutschland stellt hier im weltweiten Vergleich eine Sonderstellung dar.

Das Batterierecycling für Primärbatterien findet im Lichtbogenofen statt. Das hierbei gewonnene Ferromangan wird als Vorlegierung an Stahlwerke geliefert. Beim Batterierecycling in Deutschland wurden im Jahr 2007 insgesamt 869 t Ferromangan rückgewonnen. Dies entstammte zu 77 % aus Alkali-Mangan-Zellen, welche im Jahr 2007 einen Massenanteil von 44 % der eingesammelten Batteriemenge ausmachte (Fricke / Lührs 2008).

Da dieses Vorgehen der Manganverwertung aus Batterien im weltweiten Vergleich einen Sonderfall darstellt, werden diese Überlegungen nicht in die ausgewiesenen weltweiten Materialflüsse dieser Studie übernommen werden.

Recycling von metallischem Mangan

Es sind aufgrund der vorliegenden Literatur keine relevanten rezyklierten Mengen metallischen Mangans bekannt. Spezialfälle des Recyclings von Mangan bzw. von hochlegierten Manganstählen sind mengenmäßig vernachlässigbar.

Umweltbelastungen und Materialverluste

Wie zuvor beschrieben ist das Recycling von Mangan in Batterien und von metallischem Mangan weltweit betrachtet von stark untergeordneter Bedeutung und wird daher auch hier vernachlässigt. Das Recycling von Mangan in Stählen ist trotz seiner untergeordneten Bedeutung als Teil des Stahlrecyclings relevant für die Bestimmung der Manganverluste. Der Manganverlust aus den Stahllegierungen in den Stahlkreislauf beträgt wie zuvor erläutert 884.000 t Mangan.

Tab. IV-7: Jährliche Materialverluste beim Recycling manganhaltiger Produkte

Anwendungsbereich	Materialverlust	Bemerkungen
Stahlrecycling	ca. 890.000 t	Downcycling des Mangans

⁴ Gesetz über das Inverkehrbringen, die Rücknahme und die umweltverträgliche Entsorgung von Batterien und Akkumulatoren (BattG)

IV.2.7. Mangan in die Deponien

In Deutschland ist der Fluss des Mangans in Batterien auf Deponien rückläufig, denn sowohl die Masse der zurückgenommenen Batterien, als auch deren Verwertungsanteil steigt stetig (Fricke / Lührs 2008). Weltweit wird jedoch der Fluss an nicht rezyklierten Batterien, gegebenenfalls nach einer Abfallbehandlung, als der dominante Beitrag in die Deponien eingeschätzt. Es wird hier vereinfachend angenommen, dass die nicht-rezyklierten manganhaltigen Batterien weltweit und somit das darin enthaltene Mangan deponiert werden. Dies entspricht im Jahr 2007 weltweit einer Menge von 400.000 t Mangan.

Das in chemischen Produkten enthaltene Mangan verteilt sich auf mehrere, teils dissipative Anwendungen; ein Teil des Mangans in chemischen Produkten gelangt damit auf Deponien, doch mangels Mengenrelevanz werden diese Mengen hier nicht berücksichtigt.

Zwar sind diese Manganflüsse in die Deponien (Schlacken, Batterien) insgesamt relativ gering, doch werden die entsprechenden Mengen kumulativ dem Mangankreislauf entzogen.

IV.2.8. Mangan in die Umwelt und andere Senken

Manganhaltige Produkte, die dissipativ verwendet werden, und manganhaltige Stahlwerksschlacke, die nicht deponiert, sondern beispielsweise im Straßenbau eingesetzt wird, stellen potentielle Einträge in die Umwelt dar.

IV.3. Fazit

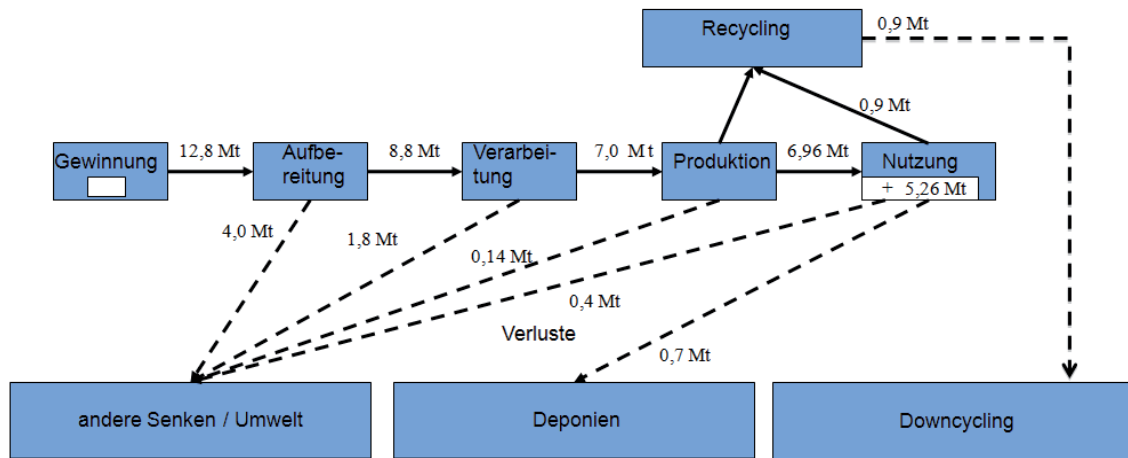
IV.3.1. Verbesserungspotential

Betrachtet man den weltweiten Manganhaushalt, so sind Verbesserungspotentiale in verschiedenen Prozessen feststellbar (Abb. IV-2). Bei der Gewinnung wäre zu prüfen, ob die Minen durch Rückbau bzw. Ersatz der Pfeiler im Untertagebau effizienter bewirtschaftbar sind. Dieses Potential wird aufgrund der ökonomischen Ausrichtung des Bergbaus als gering eingeschätzt. Mehr als die Hälfte der identifizierten Mangan-Verluste treten bei der Aufbereitung der Manganerze auf, vor allem im Feinkornbereich. Da der Feinkornanteil sich nicht für eine Weiterverarbeitung eignet, wird hier bislang kaum Verbesserungspotential gesehen.

Das Recycling manganhaltiger Produkte könnte zur effizienteren Nutzung des Rohstoffs beitragen, beispielsweise birgt eine weltweite Erhöhung der Batterierücknahme in Verbindung mit anschließendem Batterierecycling mit stärkerem Fokus auf die Manganrückgewinnung ein gewisses Potential für einen effizienteren Umgang mit Mangan, wenngleich der Einsatz von Mangan in Batterien vergleichsweise gering ist. Der Hauptanwendungsbereich von Mangan liegt im Bereich der legierten Stähle, bei deren Herstellung und Recycling wiederum auf eine Obergrenze des Gehalts an Mangan geachtet wird. Tatsächlich endet der Lebensweg von Mangan hauptsächlich in den Schlacken der Stahlproduktion.

Damit existiert praktisch kein nennenswertes Recycling von Mangan. Bezüglich der Praxis des Stahlrecyclings, Mangan systematisch in Schlacke zu überführen, wird aufgrund des hohen energetischen Aufwands bei der Manganrückgewinnung bislang kein Verbesserungspotential gesehen. Möglicherweise könnte eine konsequente Getrenntsammlung und -aufbereitung spezifischer manganreicher Schrotte geprüft werden, doch zum jetzigen Zeitpunkt wird die Versorgung mit Primärmangan als deutlich günstiger angesehen.

Abb. IV-2: Stoffhaushaltssystem Mangan mit jährlichen Flüssen; Bezugsraum: Welt



IV.3.2. Methodische Schwierigkeiten

Relevante Datenlücken

Im Rahmen dieser Untersuchung wurden teils bedeutende Datenlücken festgestellt. Wo möglich wurden Abschätzungen oder eigene Berechnungen zum Schließen der Datenlücken durchgeführt. In Einzelfällen war die Datenlage derart mangelhafte oder firmeninterne Informationen unzureichend zugänglich, so dass keine Abschätzungen möglich waren. Gegebenenfalls wurden wo möglich qualitative Aussagen getroffen.

Da für den Manganhaushalt Deutschlands keine ausreichenden Angaben verfügbar waren, konnte das deutsche Manganhaushaltssystem nicht bestimmt werden.

IV.4. Referenzen

- ABW [Professur Aufbereitung von Baustoffen und Wiederverwertung an der Universität Weimar] (2003): Informationen der Professur Aufbereitung von Baustoffen und Wiederverwertung; <http://www.uni-weimar.de/Bauing/aufber/db/index.html> (Dezember 2003)
- Adelhardt, W. / Saiger, H. (1999): Stoffmengenflüsse und Energiebedarf bei der Gewinnung ausgewählter mineralischer Rohstoffe: Teilstudie Mangan. Geologisches Jahrbuch, Sonderhefte Reihe H, Heft SH8. Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe und Staatliche Geologischen Dienste in der Bundesrepublik Deutschland (Hg.); Stuttgart: E. Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung
- Anglo American (2009): Ferrous Metals and Industries – Anglo American plc Fact Book. Firmeninformationen;
http://www.angloamerican.co.uk/aa/siteware/docs/ferrous_metals_07.pdf
(23.07.2009)
- ATSDR [Agency for Toxic Substances and Disease Registry] (2008): Toxicological Profile for Manganese (Draft for Public Comment). Public Health Service, U. S. Department of Health and Human Services; Atlanta, Georgia
- Bernandes, A. M./ Espinosa, D. C. R. / Tenorio, J. A. S. (2003): Collection and recycling of portable batteries: a worldwide overview compared to the Brazilian situation. *Journal of Power Sources*, Vol. 124, 586-592
- BGR [Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe] (2006): Pressemitteilung; http://www.bgr.bund.de/cln_145/nn_1036618/DE/Gemeinsames/Oeffentlichkeitsarbeit/Pressemitteilungen/BGR/bgr_060717.html (17.07.2006)
- Bringezu, S. (2000): Ressourcennutzung in Wirtschaftsräumen: Stoffstromanalysen für eine nachhaltige Entwicklung; Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag
- Classen M. / Althaus, H.-J. (2007): Manganese; in: Ecoinvent v2.0, Part 10; Dübendorf, Switzerland
- Corathers, L. A. (2006): Minerals Yearbook: Manganese. U. S. Geological Survey
- EC [European Commission] (2001): Best Available Techniques Reference Document on the Production of Iron and Steel. Integrated Pollution Prevention and Control (IPPC). Zusammenfassung in deutscher Übersetzung (December 2001)
- Fandrich, R. (2010): Verbandsinformationen. Persönliche Mitteilung: Telefonische Auskunft vom 03.02.2010, Stahl-Informations-Zentrum
- FEhS – Institut für Baustofforschung (2010): Institutsinformationen;
<http://www.fehs.de/schlacke/statistik.php> (21.10.2010)

- Fricke, J. / Lührs, G. (2008): Jahresbericht/Erfolgskontrolle 2007. Stiftung gemeinsames Rücknahmesystem Batterien; Hamburg
- Friedrich, B. / Sanchez, R. / Ridderbusch, M. / Möser, C (2008): Verfahrensentwicklung zur Verwertung von Zink-Kohle- und Alkali-Mangan-Alt-Batterien mit optimierter Recyclingeffizienz; Aachen
- Giegrich, J. / Liebich, A. (2008): Indikatoren/Kennzahlen für den Rohstoffverbrauch im Rahmen der Nachhaltigkeitsdiskussion; Heidelberg; unveröffentlicht
- IMnI [International Manganese Institute] (2009): Institutsinformationen; <http://www.manganese.org/production.php> (20.07.2009)
- ISA [International Seabed Authority] (2010): Regulations on prospecting and exploration for polymetallic nodules in the area; <http://www.isa.org.jm/files/documents/EN/Regs/MiningCode.pdf> (19.01.2010)
- Kennedy, B. A. (1990): Surface Mining. Society for Mining, Metallurgy and Exploitation
- Lüning (2010): Recycling hochlegierter Manganstähle. Persönliche Mitteilung vom Februar 2010, ELG Haniel
- Müller, D. / Graedel, T. E. (2003): Model Development for the Global Cycles of Iron and Its Alloying and Coating Elements. Workshop Report of NSF project MUSES, 06.-08.02.2003; unpublished
- ProBas [Prozessorientierte Basisdaten für Umweltmanagement-Instrumente] (2010): Datenbankabfrage der Datenbank ProBas; <http://www.probas.umweltbundesamt.de/php/index.php> (09.11.2010)
- Samancor Chrome (2009): Firmeninformationen; <http://www.samancorcr.com> (22.07.2009)
- Wang, X. / Müller, W. E. G. (2009): Marine biominerals: perspectives and challenges for polymetallic nodules and crusts. *Trends in Biotechnology*, Vol. 27, Nr. 6, 375-383
- Wellbeloved, D. B. / Craven, P. M. / Waudby, J. W. (2005): Manganese and Manganese Alloys; in: Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry; Weinheim: Wiley – VCH Verlag
- Worldsteel (2009): Verbandsinformationen; <http://www.worldsteel.org> (25.08.2009)
- Wuppertal Institut (2003): Materialintensitäten von Materialien und Energieträgern im Überblick (MIT-Wertetabelle), Version 2 vom 28.10.2003; http://www.wupperinst.org/info/entwd/index.html?beitrag_id=437&bid=169

V. Nickel

Dominic Wittmer,
Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie

V.1. Einleitung

V.1.1. Relevanz

Nickel ist ein sehr wichtiges Legierungselement für Stähle bzw. Spezialstähle, wo es der Erhöhung der Festigkeit, Zähigkeit und der Korrosionsbeständigkeit dient und eine bessere Hochtemperaturfestigkeit bewirkt. Aufgrund dessen ist Nickel neben Chrom und Mangan für die Stahlproduktion eines der wichtigsten Legierungselemente (Strassburg 1991). Darüberhinaus wird Nickel auch als Legierungselement für Nichteisenmetalle eingesetzt, beispielsweise in Kupferlegierungen, aber auch zur Produktion von Nickellegierungen.

Infolge des Wachstums der Stahlproduktion hat auch die Nickelnachfrage in den vergangenen Jahren stark zugenommen, insbesondere in den Schwellenländern, was in Kombination mit Marktspekulationen zu starken dynamischen Preisschwankungen geführt hat. Das Allzeithoch des Nickelpreises wurde Mitte 2007 mit über \$ 37.000 pro Tonne erreicht. Bezogen auf dieses Allzeithoch war der Preis jedoch bereits 2008 auf ein Drittel gesunken und stieg seitdem bis 2011 erneut auf zwei Drittel an. Aufgrund des zunehmenden Einsatzes in Batterien bzw. Akkumulatoren sowie für Spezialstähle ist auch mittelfristig mit starken Nachfrageschüben zu rechnen, beispielsweise durch den Bedarf an rostfreien Edelstählen, hochwarmfesten Stählen und Nickelbasismetallen für den Bau von Kraftwerken mit erhöhter Dampftemperatur.

Kritisch hinsichtlich der Verfügbarkeit von Nickel ist vor allem die starke Abhängigkeit von einer kleinen Zahl von Exportländern. Die USA hatten in der Vergangenheit ein Vorratslager für Nickel geführt, welches 1999 aufgelöst wurde¹.

¹ Es handelte sich um ein nationales Vorratslager im Rahmen des *National Defense Stockpile*, das unter anderem Nickel bevorratete (USGS 2009).

V.1.2. Charakteristika

Nickel ist im Gegensatz zu anderen unedlen Metallen (*base metals*) ein „junges“ Metall, da hierfür erst seit 1850 metallurgische Extraktionsprozesse bekannt sind (UNEP 1991). Im Mittelalter wurde es allerdings bereits genutzt, ohne es als Metall identifiziert zu haben (Reck / Gordon 2008). In seinen chemischen Eigenschaften ähnelt es Eisen, Kobalt und Kupfer (Kerfoot 1991). Es ist ein silbrig glänzendes Schwermetall, das zäh, schmiedbar und magnetisch ist. Es hat mit 1.453 °C einen hohen Schmelzpunkt und mit 2.732 °C einen hohen Siedepunkt. Bei mäßigen Temperaturen ist es sehr beständig gegenüber Luft, Meerwasser und nichtoxidierenden Säuren, aber insbesondere gegenüber Laugen. Es wird jedoch von Salmiakgeist angegriffen. Eine Besonderheit des Nickels ist seine Fähigkeit, mit Kohlenmonoxid bei relativ niedriger Temperatur direkt einen Carbonylkomplex zu bilden (Kerfoot 1991).

Seit 1979 wird hochreines Nickel (Class I Nickel) an der *London Metal Exchange* (LME) gehandelt.

Vorkommen

Die Ressourcen an Nickel sind geographisch relativ weit verteilt, jedoch gibt es weder in Europa, noch in den USA bedeutende Ressourcen. Die Nickelreserven umfassten im Jahr 2008 70 Mt und die jährliche Förderrate ca. 1,6 Mt, was einer statischen Reichweite von 44 Jahren entspricht (nach Kuck 2009). Die wichtigsten Nickelförderländer sind Russland, Kanada und Australien (sulfidische Erze) sowie Indonesien, Russland, Neukaledonien und Australien (oxidische Erze) (Kuck 2009, Hilbrans / Hinrichs 1999); bei den Nickelexporturen ist zusätzlich Norwegen zu nennen.

Im Erdkern tritt Nickel in Kombination mit Eisen gesteinsbildend auf, doch in der Erdkruste ist es weit weniger häufig. Elementares Nickel kommt lediglich in Eisen-Nickel-Meteoriten vor. In Böden tritt Nickel als Spurenelement in Silikaten auf (Lascelles / Nicholls 1991).

Für die Nickelgewinnung sind die sulfidischen und die oxidischen Erze von ähnlich großer Bedeutung (im Gegensatz zu den deutlich von Sulfiden dominierten anderen unedlen Metallen). Obwohl die sulfidischen Erze nur ca. 20 % der Nickelressourcen ausmachen, tragen sie zu 60 % zur Produktion bei, da diese gegenüber den oxidischen Erzen hinsichtlich diverser geographischer, ökonomischer und anderer Faktoren Vorteile aufweisen (Kerfoot 1991). Die bedeutendsten Nickelerzminerale sind unter den Sulfiden Pentlandit ((Fe,Ni)S), Millerit, nickelführender Magnetkies und Kupferkies, unter den Oxiden die lateritischen Nickelerze und Garnierit, häufig gebunden an Limonit. Ökonomisch relevant sind lediglich Pentlandit, Garnierit und nickelführender Limonit. In der Regel tritt Nickel mit anderen Metallen vergesellschaftet auf (wie auch bei den anderen unedlen Metallen üblich), nämlich bei sulfidischen Erzen vorwiegend mit Kupfer, Edelmetallen, Kobalt, Eisen und Schwefel sowie bei Lateriten vorwiegend mit Kobalt (UNEP 1991, Hilbrans / Hinrichs 1999). Typische Nickelgehalte betragen für sulfidische Erze 0,3-3,0 %, für lateritische Erze ca. 1,5 %. Platin wird des Öfteren als Nebenpro-

dukt von Nickel gewonnen, so dass das Platinangebot direkt von dem Volumen der Nickelgewinnung beeinflusst wird (Wäger et al. 2010), aber auch das Angebot anderer Platingruppenmetalle, Gold und Kobalt. Zurzeit findet eine weltweite Konsolidierung der Nickelgewinnung statt (Kuck 2009).

Im Vergleich mit den anderen Nichteisenmetallen weist Nickel die Sonderheit auf, dass der Erztyp bzw. seine Aufbereitung die Verwendung des Nickels mitbestimmt: So wird Nickel aus oxidischen Erzen (Lateriten) vollständig in rostfreien Stählen bzw. der Eisenmetallurgie eingesetzt, jenes aus den sulfidischen Erzen überwiegend in anderen Einsatzbereichen wie Münzen, Batterien, Nickellegierungen und Oberflächenveredelung und nur untergeordnet in Stählen (Hilbrans / Hinrichs 1999). Ursache für diese Sonderheit ist, dass die Nickel-„Zwischenprodukte“ der Laterite sich im Gegensatz zu jenen der sulfidischen Erze bereits für die Produktion rostfreier Stähle eignet, so dass erstere aufgrund des geringeren Produktionsaufwandes bevorzugt werden.

In den 1970er und 1980er Jahren wurde die Gewinnung von Nickel aus sogenannten Manganknollen² (Nickelgehalt 0,5-1,5 %) der Tiefsee hinsichtlich ihrer Machbarkeit untersucht, doch infolge der hohen Gewinnungskosten, die deutlich diejenigen der terrestrischen Lagerstätten übertreffen, und der damals tiefen Nickelpreise wurde diese Option in den darauffolgenden Jahren nicht weiter verfolgt. Seit die Rohstoffpreise für Metalle nach 2005 angestiegen waren, erhielt die Diskussion wieder neuen Auftrieb. Es ist zu erwarten, dass in Zukunft die Manganknollen – vor allem jene im Pazifik – eine relevante Bedeutung bei der Nickelgewinnung erhalten (Kerfoot 1991).

In Deutschland wird kein Nickelerz abgebaut und kein Primärnickel produziert, sondern in Form von Produkten verschiedener Verarbeitungsstufen importiert. Der Import von Nickel betrug im Jahr 2009 ca. 74.000 t (Nickelinhalt von Nickelmetall und Ferronickel) (BGR 2010)³.

Der TMR (Globaler Materialaufwand, engl.: *Total Material Requirement*) von Nickel (Nickelmetall) beträgt 100-200 t/t; in einer Untersuchung wurde er bezogen auf die in Deutschland verwendeten Rohstoffe zu 141 t/t Nickel bestimmt (Wuppertal Institut 2003); für Ferronickel, das gegenüber reinem Nickel noch hohe Anteile an Eisen enthält (Nickelgehalt 25 %), wurde der TMR zu 60 t/t entsprechend niedriger bestimmt. Damit ist der TMR für Nickel im Vergleich zu demjenigen anderer Nichteisemetalle relativ hoch.

Toxizität

Nickel wird unter anderem auch in Alltagsgegenständen verwendet wie in Münzgeld und bei der Lebensmittelverarbeitung (Lascelles / Nicholls 1991). Bei normaler Handhabung und Anwendung stellt die Exposition durch massives Nickel eine geringe Ge-

² Weitere Erläuterungen in der Box 1 „Manganknollen“ in Kapitel IV Mangan.

³ Im Jahr 1994 wurden ca. 104.000 t Nickel importiert (Nickelinhalt), wobei nur ca. 10.000 t exportiert wurden und der Rest im Inland weiterverarbeitet oder direkt genutzt wurde (Hilbrans / Hinrichs 1999).

sundheitsgefahr dar, im Gegensatz zu jener in Form von Staubpartikeln. Daher treten Intoxikationen praktisch nur bei beruflicher Exposition auf. Die akute Toxizität, das ist die schädigende Wirkung infolge einer Einzeldosis einer Substanz, kann durch unterschiedliche Tests gemessen werden. Die letale Dosis von Nickel wurde in einem LD₅₀-Test zu > 9000 mg/kg bestimmt (ThyssenKrupp 2008). Bei beruflicher Exposition besteht Verdacht auf krebserzeugende Wirkung in den Lungen oder der Nase (Lascelles / Nicholls 1991, IPCS/CEC 2010). Krebsentstehung wurde bei Ratten nachgewiesen. Darüber hinaus kann durch Unfälle Nickelcarbonylgas freigesetzt werden, wobei schwere Vergiftungen drohen.

Bei empfindlichen Personen kann wiederholter Kontakt mit Reinnickel zur Sensibilisierung bzw. zu allergischen Reaktionen führen, deren Auftreten in der Bevölkerung in den vergangenen Jahren zugenommen hatte, bis hin zur Ausbildung einer Nickelkontaktdermatitis. Beispielsweise wurde für Dänemark berichtet, dass von derartigen Reaktionen 10 % der Frauen und 2 % der Männer betroffen sind. Aufgrund der Gesundheitsgefahren wurden entsprechende Grenzwerte festgelegt bzw. revidiert (Lascelles / Nicholls 1991).

Erdöl und Kohle enthalten Spuren von Nickel, das bei der Aufbereitung teils angereichert und bei der Verbrennung freigesetzt wird. Daher sind die Verbrennung fossiler Brennstoffe und andere industrielle Aktivitäten wie die Metallverarbeitung die wichtigsten anthropogenen Quellen von Nickel-Emissionen (Nriagu / Pacyna 1988); Nickel liegt in der Umwelt überwiegend in Form von Sulfaten und Oxiden vor (Lascelles / Nicholls 1991). In Bezug auf Trinkwasser betrug der Grenzwert für Nickel 50 µg/l im Jahr 1999, wobei jedoch eine Verschärfung auf 20 µg/l diskutiert wurde. Für Pflanzen ist Nickel zwar ein bedeutendes Spurenelement, doch ab einer Konzentration von wenigen ppm verringert sich das Pflanzenwachstum massiv. Eine Akkumulierung auf landwirtschaftlichen Flächen über den Eintrag von Klärschlamm kann daher schädlich sein. Auch in aquatischen Systemen wurde für Nickel eine akute Toxizität ab ca. 0,05 mg/l festgestellt (nach Lascelles / Nicholls 1991).

V.1.3. Anwendungsbereiche

Der größte Anteil des Nickels (ca. 85 % des weltweiten Nickelverbrauchs) wird vielfältig als Legierungselement metallischer Werkstoffe eingesetzt, maßgeblich in Stählen und Spezialstählen. Neben Eisen wird es auch mit Chrom, Kupfer, Kobalt, Molybdän und weiteren Metallen legiert. Den größten Teil des Einsatzes in Legierungen (mehr als 60 % des Gesamtverbrauchs) macht die Herstellung nichtrostender Edelstähle aus. Desweiteren wird es in anderen legierten Stählen eingesetzt, in Nichteisenlegierungen und in Superlegierungen, aber auch in Nickellegierungen und als reines Metall. Legierte Stähle, für die Nickel eingesetzt wird, sind Chromnickelstahl, Molybdänstahl und Titanstahl (Wikipedia 2010). Untergeordnet wird es auch in der Galvanotechnik und in anderen Anwendungen eingesetzt (Kuck 2009). Ein wichtiger Einsatzbereich von nickelführenden hochtemperaturfesten Stahllegierungen bzw. Superlegierungen sind

Wärmeleistungswerke (sogenannte 700° C-Klasse), wo durch die Erhöhung der Dampf-temperatur die Effizienz gesteigert werden konnte, oder auch Kernkraftwerke (Kuck 2009). Entsprechend der hohen Bedeutung der Stähle für das Nickelsystem wird der Nickelpreis maßgeblich von der Nachfrage durch den Stahlmarkt mitbestimmt (Hilbrans / Hinrichs 1999).

Die Verschiedenheit der nickelführenden Legierungen ermöglicht eine Vielfalt in den Anwendungsfeldern. Es sind dies neben den oben genannten Anwendungen auch Haushaltsartikel, Fässer, Tanks, Münzen (3 %) und zunehmend auch hochwertige Batterien (Nickel-Oxyhydroxid, Zink-Nickel) und Akkumulatoren (Nickel-Cadmium, Nickel-Metallhydrid). Letztere sind verbreitet im Einsatz zur Speicherung von Energie in Personenfahrzeugen mit Hybridmotoren oder auch reinen Elektromotoren, die zunehmend in Serie gehen und in wachsender Stückzahl produziert werden, dort jedoch zunehmend von leistungsfähigeren Akkumulatoren auf Lithiumbasis konkurriert werden. Der Anteil von Nickel in elektrischen Zellen beträgt bisher ca. 5 % des gesamten Nickelverbrauchs und wächst stark – trotz der Konkurrenz der Akkumulatoren auf Lithiumbasis.

Reines Nickel wird unter anderem zur Herstellung von Laborgeräten eingesetzt, als Legierungselement in Temperaturmeßfühlern sowie zur Vergütung unedler Metalle (Vernickeln). Darüberhinaus wird Nickel zur Färbung von Kunststoffen und schwarzem Glas verwendet.

Der mit Abstand größte Nickelverbraucher ist heute die Volksrepublik China („apparent consumption“ in 2007: 348.000 t), maßgeblich aufgrund seiner dominierenden Stahlindustrie, die jene der Vereinigten Staaten und Japan seit mehreren Jahren übertrifft, und den starken Zuwächsen bei der Produktion von Edelstahl (nach Kawamoto 2008). Der Verbrauch von Nickel hat sich dadurch innerhalb von acht Jahren (1999-2007) verachtfacht.

Substitutionsmöglichkeiten

Für rostfreie Stähle gibt es bislang praktisch keine Alternative zu den Legierungsmetallen Nickel und Chrom (Müller 2003). Allerdings können sich diese beiden Metalle gegenseitig substituieren: Der Nickelgehalt in Stählen kann bei gleicher Korrosionsbeständigkeit verringert werden, indem der Chromgehalt erhöht wird, was in den vergangenen Jahren aufgrund des niedrigeren Chrompreises häufig angestrebt wurde. Auf diese Weise können bei technischer Eignung nickelfreie rostfreie Spezialstähle eingesetzt werden, beispielsweise in der Stromproduktion und der petrochemischen Industrie. Hinsichtlich der Korrosionsbeständigkeit können Titanlegierungen (im Temperaturbereich 500-900 °C) oder Spezialkunststoffe als Substitute für nickelhaltige Legierungen verwendet werden. Bei den Akkumulatoren kann die Lithium-Ionen-Technik aufgrund von Kostensenkungen mit der Nickel-Metallhydrid(NiMH)-Technik konkurrieren (Kuck 2009).

V.2. Umweltbelastungen und Materialverluste

V.2.1. Abbau

Im Jahr 2000 wurde in Form diverser Erztypen (mit diversen Nickelgehalten) insgesamt Nickel in Höhe von 1,34 Mt abgebaut (Reck / Gordon 2008)⁴. Die gewonnenen Nickelerze und nickelhaltigen Erze lassen sich in sulfidische Erze und oxidische Erze unterteilen (Kerfoot 1991); bezogen auf den Nickelgehalt der gewonnenen Erze tragen die sulfidischen Erze zu ca. 60 %, die lateritischen zu ca. 40 % bei (Hilbrans / Hinrichs 1999). Da diese sich in ihrer Lagerung und Zusammensetzung unterscheiden und beide mengenmäßig bedeutend sind, werden sie in den folgenden Kapiteln separat beschrieben, soweit dies für die technisch-wirtschaftliche Verarbeitung von Bedeutung ist.

Sulfidische Erze

Die sulfidischen Erze werden zu ca. 95 % im Untertagebau gewonnen. Der Nickelgehalt der für die Nickelgewinnung genutzten Erze streut zwischen 0,3 % und 3,5 %; sie enthalten durchschnittlich 1,4 % Nickel⁵ und werden durch Bohren oder Sprengen gelöst (Hilbrans / Hinrichs 1999, Pohl 2005, Kerfoot 1991). Die Bauwürdigkeitsgrenze streut für die verschiedenen Lagerstättentypen naturgemäß. Für den Abbau im Tagebau kann das Erz : Abraum-Verhältnis bis zu 1 : 3,0 betragen.

Die Gangart der sulfidischen Erze von unedlen Metallen besteht häufig aus Eisensulfiden (Pyrit, Pyrrhotin), die zu *acid mine drainage*⁶ führen können und damit Grundwasser und Oberflächenwasser bedrohen (UNEP 1991). Die Abbaumethoden für sulfidische Nickelerze sind derart angepasst, dass die durchschnittliche Extraktionsrate 92 % erreicht. Grubenberge und Aufbereitungsberge werden bevorzugt als Füllmaterial für die Stollen verwendet, doch i. d. R. ist der Abraum nicht während der Abbauphase rückverfüllbar und überschüssige Grubenberge werden auf Halde gelagert, wo sie aufgrund ihrer Sulfidgehalte als umweltgefährdend einzustufen sind. Weitere unerwünschte Beimengungen der sulfidischen Erze sind Arsen, Cadmium und Blei (Hilbrans / Hinrichs 1999).

Die bedeutendsten nickelführenden Minerale sulfidischer Erze sind nickelführender Pyrrhotin, Pentlandit und Chalkopyrit (Kerfoot 1991). Häufig treten in nickelhaltigen Erzen gleichzeitig Kupfer (bis zu 2,0 %), Kobalt, Platingruppenmetalle, Gold, Silber, Tel-

⁴ Im Rahmen des *Stocks and Flow Projects* (STAF) wurde das globale Nickelsystem systematisch für das Jahr 2000 untersucht (Reck et al. 2008; Reck / Gordon 2008). Zur Erhöhung der Konsistenz zwischen den Angaben zu den verschiedenen Prozessen wurde hier derselbe Datensatz zugrundegelegt und ggf. mit aktuelleren Zahlen ergänzt, z.B. bei starken Veränderungen gegenüber dem Jahr 2000.

⁵ Die unter Tage abgebauten Erze weisen mit 2,5 % Nickel im Durchschnitt höhere Nickelgehalte auf als die über Tage abgebauten mit 0,5 % (Summe Nickel und Kupfer)(Hilbrans / Hinrichs 1999).

⁶ *Acid mine drainage* ist die durch Oxidation sulfidhaltiger Minerale entstehende anorganische Wasserverschmutzung durch ausfallende Eisenverbindungen oder gelöste Schwermetalle wie Kupfer und Nickel. Sie tritt während und nach dem Betrieb entsprechender Minen auf.

lur, Selen, Eisen und Schwefel auf, welche den Wert der Erze erhöhen, da diese als Koppelprodukte gewonnen werden können; der Schwefelgehalt beträgt 5-20 % (Kerfoot 1991, Hilbrans / Hinrichs 1999).

Lateritische Erze

Bei den lateritischen Erzen bzw. Lateriten⁷ handelt es sich um oxidische und silikatische eisenreiche Erze, welche meist oberflächennah vorkommen und entsprechend im Tagebau abgebaut werden. Ihr Nickelgehalt beträgt durchschnittlich 1,9 %. Typische Erz : Abraum-Verhältnisse reichen von 1 : 0,5 bis 1 : 3,0. Aufgrund der relativ geringen Mächtigkeiten (meist < 10 m) sind die Ausdehnungen der Tagebau-Minen zuweilen gewaltig. Die lateritischen Erze werden mit Baggern und Frontschaufelladern abgetragen, wobei ein erheblicher landschaftlicher Eingriff und Flächenverbrauch stattfindet. Heutzutage wird der Abraum teilweise bereits während des Abbaus in die Tagebauminen verfüllt und rekultiviert. Zum Erreichen einer gleichbleibenden Erzqualität wird das Erz nach der Extraktion in der Regel intensiv gemischt. (Hilbrans / Hinrichs 1999)

Da der Gesamtenergieverbrauch zu beträchtlichem Anteil durch die zu transportierenden Abraummenen bestimmt ist, ist das Erz : Abraum-Verhältnis von entscheidender Bedeutung (Hilbrans / Hinrichs 1999). Eine Quantifizierung ist hier aufgrund fehlender Daten nicht möglich.

Umweltbelastungen und Materialverluste

Sulfidische Erze:

Durch Wahl des geeigneten Abbauprozesses kann man die Abbauverluste auf 5-20 % beschränken; die kostengünstigen Bruchbaumethoden treten aufgrund ihrer hohen Abbauverluste (ca. 40 %) nur selten auf (Hilbrans / Hinrichs 1999). Für mehrere Minen wird ein Nickelverlust in die Abgänge von 5-6 % berichtet (nach Kerfoot 1991).

Lateritische Erze:

Die Abbauverluste werden auf ca. 5 % eingeschätzt (Hilbrans / Hinrichs 1999). Insgesamt wurden die Nickelverluste im Abraum für das Jahr 2000 zu 167.000 t bestimmt (Reck / Gordon 2008, siehe auch **Abb. V-3**).

⁷ Laterite sind Produkte der chemischen Verwitterung kaolinisierter Muttergesteine (Peridotite) und bestehen überwiegend aus Kaolinit, Goethit, Hämatit, Gibbsit und Quarz (Murawski 1992, Hilbrans / Hinrichs 1999, Kerfoot 1991).

Tab. V-1: Umweltbelastungen und jährliche Materialverluste beim Abbau von Nickelerzen und nickelhaltigen Erzen

Erztypen ⁸	Umweltbelastung ⁹	Materialverluste	Bemerkungen
Sulfidische Erze	Sprenggase: ca. 77 kg Sprengstoff/t Nickel; Dieselabgase: ca. 200 l Diesel/t Nickel; Kohlendioxid: ca. 560 kg/t Nickel; Abwasser: Störung von Oberflächengewässer und Grundwasser; Abraum ¹⁰ /Berge (Halden): Flächeninanspruchnahme, <i>Acid Mine Drainage</i> ⁶	ca. 5-20 % Abbauverluste ¹¹	sulfidische Erze werden zu 95 % im Untertagebau abgebaut
Laterite	Dieselabgase: ca. 200 l Diesel/t Nickel; selten Sprenggase; ggf. Grubenwässer in Oberflächengewässer und Grundwasser (geringe Umweltbelastung zu erwarten); Flächeninanspruchnahme durch Abbau bewirkt weiträumigen Eingriff in die Landschaft, Abraum zwischen 50 % und 300 % der abgebauten Erzmenge	ca. 5 % Abbauverluste ²⁰	Laterite werden fast ausschliesslich im Tagebau abgebaut
durchschnittliche Weltproduktion“ (Hilbrans / Hinrichs 1999)	Abraum/Grubenberge: 52 t/t Nickel, davon nicht genutzte Aufbereitungsberge: 16 t/t Nickel Abgase: ca. 560 kg Kohlendioxid/t Nickel Grubenwasser: 42 m ³ /t Nickel	167.000 t	

V.2.2. Aufbereitung

Eine Aufbereitung findet lediglich bei den sulfidischen Erzen statt, da nur diese auf günstige Weise mit physikalischen Methoden angereichert werden können (Kerfoot 1991). Die globale Minenproduktion von Nickel betrug 1,1 Mt im Jahr 2000 und 1,7 Mt im Jahr 2007 (Reck / Gordon 2008, Kuck 2009).

Sulfidische Erze

Die Gangart sulfidischer Erze von unedlen Metallen besteht häufig aus Eisensulfiden (Pyrit, Pyrrhotin). Zu Beginn der Aufbereitung werden die Nickelerze aufgemahlen,

⁸ Die globalen Angaben in der Tabelle beruhen auf sieben erz- bzw. konzentratspezifischen Verfahren, die separat untersucht und anschließend gewichtet aggregiert wurden, sowohl für sulfidische Erze und Laterite, als auch für den Weltdurchschnitt (Hilbrans / Hinrichs 1999).

⁹ Unter Umweltbelastung werden hier unter anderem Emissionen (z.B. Kohlendioxid), und Ressourcenverbrauch (z.B. Flächeninanspruchnahme) verstanden. Ausgeschlossen sind mittelbare Größen wie Energieverbrauch. Die relativen Mengenangaben beziehen sich auf die erforderlichen Stoffmengen im Weltdurchschnitt zur Produktion von einer Tonne Nickel (Hilbrans / Hinrichs 1999).

¹⁰ Der Abraum kann im Tagebau bis zu 300 % des abgebauten Erzes betragen, zu Beginn der Abbau-phase auch mehr (Hilbrans / Hinrichs 1999).

¹¹ Der Begriff Abbauverluste beschreibt hier die Verluste an Nickel in nickelführenden Erzen vor der Erzaufbereitung, bezieht sich also auf das Nickel in den gesamten abgebauten nickelführenden Erzen.

häufig bis zu 80 % < 75 µm (Hilbrans / Hinrichs 1999). Die bedeutendste Aufbereitungsmethode zur Anreicherung der Nickelsulfiderze ist die Flotation, oft auch mehrstufig, nach der das Nickelkonzentrat (4-10 % Nickel) entwässert wird.

Entscheidend für das Nickelausbringen und den Nickelgehalt der Konzentrate ist der Umgang mit Pyrrhotin, wobei sich diese beiden Zielgrößen gegenseitig konkurrenzieren (Kerfoot 1991). Pyrrhotin wird mittels magnetischer Separation, gegebenenfalls auch durch Flotationsseparation, von den Nickelmineralen bestmöglich abgetrennt (UNEP 1991), doch eine vollständige Trennung ist nicht möglich. Die Nickelkonzentrate bzw. Nickel-Kupfer-Mischkonzentrate erreichen Nickelgehalte von 4-20 %, durchschnittlich ca. 8 %¹².

Oxidische Erze

Oxidische Erze weisen eine Feuchte im Bereich 22-40 % auf; sie können nach Trocknung direkt in pyrometallurgische oder hydrometallurgische Prozesse eingebracht werden und benötigen keine aufwändige Aufbereitung (UNEP 1991). Bei einer Absiebung von verhärteten, nickelärmeren Gesteinskörpern findet eine leichte Anreicherung des Nickelgehaltes statt, beispielsweise von 1,5 % auf 1,7 %; Nickelverluste sind hierbei in der vorliegenden Fachliteratur nicht dokumentiert und werden als vernachlässigbar erachtet. Die Trocknung ist jedoch häufig mit fossilen Brennstoffen durchgeführt worden, so dass ca. 30 % des gesamten Energieverbrauchs der Aufbereitung und metallurgischen Verarbeitung auf die Trocknung entfällt.

Umweltbelastungen und Materialverluste

*Acid mine drainage*⁶ tritt häufig dort auf, wo pyrit- oder pyrrhotinhaltige Gesteine aufgeschlossen sind und auf den Grundwasserspiegel treffen (UNEP 1991). Die nicht verwertbaren abgetrennten eisensulfidhaltigen Gesteine bedrohen daher das Grundwasser und Oberflächengewässer durch ihre relativ hohen Schwermetallgehalte (UNEP 1991).

Abwasser der Aufbereitung der Nickelsulfide durch Flotation kann die Umwelt belasten, indem Schwebstoffe, Schwermetalle in Lösung, Thiosalze (Thiosulfate) oder Flotationsmittel freigesetzt werden. Typische Werte eingesetzter Flotationsmittel sind pro Tonne Nickelsulfiderz: 35-60 g Kupfersulfat, 500-600 g Schwefelsäure, 225-400 g Kalk, 60-85 X-Amyl-xanthate, 20-25 g Dowfroth 250 (Schäumer). Abgesehen von Kupfersulfat sollten in gut abgestimmten Flotationsprozessen die meisten Chemikalien an die Mineralienoberfläche gebunden sein (UNEP 1991); dort sind sie einer Freisetzung weitgehend entzogen.

Für zwei bedeutende Aufbereitungstypen sind die Verluste in die Abgänge angegeben zu 6 % (Clarabelle-Hütte) bzw. 12 % (Copper Cliff-Hütte, inklusive 7 % in Pyrrhotin-

¹² Höhere Nickelgehalte sind technisch möglich, doch würden diese höhere Nickelverluste bedingen (Hilbrans / Hinrichs 1999).

Konzentraten) des Nickelgehaltes (Kerfoot 1991); es wird hier der durchschnittliche Wert von 9 % Nickelverlust angenommen. Die abgelagerten Rückstände der Aufbereitung haben technisch begründet Wertmetallanteile von ca. 0,1 % (Hilbrans / Hinrichs 1999).

Oxidische Erze hingegen werden kaum aufbereitet. Durch Siebklassierung findet eine sehr schwache Anreicherung um ca. 0,1-0,2 % Nickel statt (Hilbrans / Hinrichs 1999); die Verluste werden hier als vernachlässigbar eingeschätzt. Das Einsparpotential für Energie bei der Trocknung ist relevant; es kann durch Vortrocknung durch Sonnenwärme, Vakuumtrocknung oder Einsatz von Prozessrestwärme realisiert werden (Hilbrans / Hinrichs 1999).

Insgesamt werden die Nickelverluste bei der Aufbereitung auf 74.000 t geschätzt (Reck / Gordon 2008).

Tab. V-2: Umweltbelastungen und jährliche Materialverluste bei der Aufbereitung der Nickelerze

Nickelerz (Mineral)	Umweltbelastung	Materialverluste	Bemerkungen
Sulfidische Erze	Aufbereitungsberge (Halde): Flächeninanspruchnahme, Acid Mine Drainage bei Eisensulfiden Wasserverschmutzung durch gelöste Schwermetalle, Säuren, Thiosalze, Schwebstoffe, Flotationsmittel ¹³ : 39 kg/t Nickel	Verluste beim Nickelausbringen ca. 9 % (Pyrrhotin-Konzentrat und Tails), das sind ca. 72.000 t ¹⁴	
Laterite, Nickeloxide	ausgesiebte Härtlinge werden auf Berge gelagert: Flächeninanspruchnahme	vernachlässigbar	
durchschnittliche Weltproduktion“ (Hilbrans / Hinrichs 1999)	Aufbereitungsberge (Halde): 46 t/t Nickel, davon nicht genutzter Anteil 29 t/t Nickel	ca. 74.000 t	

V.2.3. Verarbeitung

Die Prozesse der Verarbeitung von Nickelkonzentraten bzw. -erzen finden in Hütten statt und sind wesentlich dem Ausgangsgestein angepasst (Stadelhofer et al. 2009), damit also sehr vielfältig: „nahezu alle in der Metallurgie und der anorganischen Chemie bekannten Verfahrensschritte“ werden bei der Verarbeitung von Nickel genutzt, so dass hier nur ausgewählte wichtige Prozessrouten dargestellt werden können (Hilbrans / Hinrichs 1999). Da vergesellschaftete Metalle wie Eisen, Kupfer und Kobalt die chemisch-metallurgische Konzentrierung und Raffination erschweren, kommen bei der Nickelherstellung teils komplexe Verfahren zur Anwendung; die Verarbeitung erfordert in jedem Fall einen relativ hohen Energieaufwand, so dass die gewählte Verfahrensrouten

¹³ Typische Einsatzmengen von Flotationsmitteln pro Tonne Nickelsulfiderz sind im Text angegeben.

¹⁴ Gewinnung mal 60 % (Anteil sulfidischer Erze) mal 9 % = 72.360 t/a.

unter anderem von der Verfügbarkeit günstiger Energie abhängt bzw. deren Energieform. Es lassen sich bei der metallurgischen Verarbeitung grob zwei Verfahren unterscheiden: die pyro- und die hydrometallurgische Verarbeitung, wobei die pyrometallurgische Verarbeitung überwiegt (Hilbrans / Hinrichs 1999). Beide Verfahren kommen sowohl für sulfidische, als auch für lateritische zur Anwendung.

Die weltweite Hüttenproduktion von Nickel betrug im Jahr 2000 ca. 1,12 Mt (Reck / Gordon 2008) und im Jahr 2007 ca. 1,34 Mt (Kuck 2009).

Sulfidische Erze

Das Nickelausbringen bei den sulfidischen Erzen variiert in Abhängigkeit der Konzentrationseigenschaften zwischen 60 % und 95 %. Es werden zahlreiche Verfahren zur metallurgischen Gewinnung von Nickel aus sulfidischen Erzen angewandt¹⁵. Grundsätzlich besteht der Verhüttungsprozess aus den Prozessen Rösten, Schmelzen und Konvertierung. Man unterscheidet hierbei Verfahrenslinien für Nickelkonzentrate (ca. 10-11 % Nickel) und für Nickelkupferkonzentrate (3-8 % Nickel) (Hilbrans / Hinrichs 1999). Den beiden Verfahren sind die ersten Verfahrensstufen gemein, nämlich das Trocknen und das (partielle) Rösten, bei dem das sulfidische Erz in oxidierte Form überführt wird. Dabei wird das Eisen als Oxid im Elektroofen verschlackt. Der dabei freigesetzte Schwefel wird nach Möglichkeit abgetrennt und zur Industriechemikalie weiterverarbeitet, doch wo der finanzielle Aufwand zu groß ist oder es keine Nachfrage nach Schwefelsäure in ökonomischer Transportdistanz gibt, wird er nach chemischer Umwandlung deponiert oder in Form von Schwefeldioxid in die Atmosphäre emittiert (Kerfoot 1991).

I. Verfahren für Nickelkonzentrate

(Ia) Nach dem Rösten werden die entstandenen Nickeloxide im Flammofen zu Nickelstein verschmolzen, bei dem es sich um ein komplexes Sulfid handelt. Dieser wird anschließend im Konverter durch Verblasen mit Druckluft vom Eisenanteil befreit, wobei die nickelreiche Konverterschlacke erneut in den Elektroofen zurückgeführt wird und Nickelverluste kaum auftreten. Nickelfeinstein („Nickelmatte“), das Produkt aus dem Konverter, enthält neben Nickel (ca. 75 %), Kupfer und Schwefel (ca. 20 %) auch kleinere Mengen an Kobalt, Eisen, Sauerstoff und Spuren von Edelmetallen und unerwünschten Spurenstoffen. Der Nickelfeinstein wird zu Anoden gegossen und einer Reduktionselektrolyse unterzogen. Als Produkt erhält man Nickel in handelsüblicher Reinheit. Nach Umsatz von 75-80 % der Anoden werden die verbleibenden Anodenreste eingeschmolzen und erneut der Elektrolyse zugeführt (Hilbrans / Hinrichs 1999).

Ein Teil der Matte wird pyrometallurgisch (d.b. thermisch) weiterverarbeitet (Kerfoot 1991).

¹⁵ Das geeignetste Verhüttungsverfahren hängt i. d. R. von den Mengenverhältnissen der Minerale Pyrrhotin, Pentlandit und Chalkopyrit ab (Kerfoot 1991). Aufgrund der Vielfalt an Verfahren kann hier nur ein Überblick über die wichtigsten zum Einsatz kommenden Verfahren gegeben werden.

(Ib) Alternativ zur Verarbeitung im Elektroofen kann Nickelstein auch im Schwebeschmelzverfahren erzeugt werden, welches statt elektrischer Energie überwiegend Energie in Form von Erdgas erfordert; diese Alternative ist nur rentabel, wo günstiges Erdgas zur Verfügung steht. Nach Trocknung des Konzentrates werden – analog zu (Ia) – die Nickelkonzentrate zu Nickelstein bzw. Kupfer-Nickel-Eisen-Stein verschmolzen. Dabei fallen pro Tonne Nickel ca. 5 t Schlacke an, welche nach Nachbehandlung nur ca. 0,15-0,30 % Nickel enthält. Der Nickelstein (44 % Nickel) wird durch Verblasen im Konverter auf 70-75 % Nickel angereichert; auch hier wird die anfallende Konverterschlacke in den Schwebeschmelzofen zurückgeführt. Als Produkt erhält man Nickelfeinstein, auf den eine mehrstufige Drucklaugung angewandt wird (unter Zugabe von Ammoniak). Schließlich wird aus der gereinigten Lauge das Nickel mithilfe von Wasserstoff (hergestellt aus Erdgas) reduziert. Das Nickelpulver wird gesintert und zu Rondellen verarbeitet, in der Regel durch Wärmebehandlung (Hilbrans / Hinrichs 1999).

In beiden Verfahren wird das Schwefeldioxid der Röstgase zu Schwefelsäure verarbeitet. Die gereinigte Schlacke wird als Baumaterial genutzt (EC 2001).

II. Verfahren für Nickelkupferkonzentrate

Auch bei den Nickelkupferkonzentraten kommen mehrere Verfahren zum Einsatz. Die folgenden Rohhüttenverfahren sind die bedeutendsten (Hilbrans / Hinrichs 1999):

- (IIa) Rösten in Wirbelschicht, kombiniert mit Elektroofenschmelzen und Verblasen im Konverter.
- (IIb) Schwebeschmelzen mit Verblasen des Rohsteins im Konverter; dieses Verfahren ähnelt dem von (Ib), jedoch erfordert die Trennung von Kupfersulfid und Nickelsulfid anschließend statt der Drucklaugung hier die Abfolge von Tempern, Mahlen und Flotation; das Nickelsulfid wird zu Nickeloxid geröstet, das daraufhin zu Metall reduziert wird; unerwünschte Verunreinigungen werden durch Elektrolyse entfernt.
- (IIc) Rösten im Etagenofen, kombiniert mit Schmelzen im Flammofen zu Rohstein und anschließendem Verblasen im Konverter zu Feinstein. Im Anschluss ähnelt dieses Verfahren demjenigen von (IIb), lediglich bei der Entfernung von Verunreinigungen werden statt der Elektrolyse ein Carbonylverfahren¹⁶ angewandt; man erhält reine, nahezu kobaltfreie Nickelqualitäten, z.B. Carbonylnickel (Nickelgehalt 98,5 % bis 99,8 %) und Mond-Kugelnickel (99,5 %). Als Nachteil der

¹⁶ Bei Carbonylverfahren bilden Eisen, Nickel und Kobalt mit Kohlenmonoxid gasförmige Verbindungen (sogenannte Carbonyle), doch bei weiterer Temperaturerhöhung werden die Carbonyle bei stoffspezifischen Temperaturen wieder zersetzt, so dass eine Stofftrennung ermöglicht wird.

Flammofen Variante (IIc) wird zunehmend gesehen, dass die spezifisch geringen Gehalte an Schwefeldioxid dessen wirtschaftliche Rückgewinnung verhindern, so dass dieses in den Abgasen der Öfen verbleibt und dadurch in die Umwelt gelangt.

Charakteristisch für die Verarbeitung der Nickelkupferkonzentrate (IIa, IIb, IIc) ist die Trennung des Nickelkupfersteins in Nickel und Kupfer. Hier werden – inklusive der oben genannten Verfahren – insgesamt vier verschiedene Verfahren eingesetzt, nämlich die ammonalkalische Drucklaugung (insbesondere bei nickelarmen Erzen), die schwefelsaure Drucklaugung, die chloridische Laugung sowie das Tempern. Grundsätzlich kann jedes der vier Verfahren ökologisch einwandfrei betrieben werden (Hilbrans / Hinrichs 1999). Auch bei der anschließenden Nickelgewinnung aus den Zwischenprodukten werden diverse verschiedene Verfahren genutzt, über deren Umweltrelevanz jedoch auf Basis der vorliegenden Literatur keine Aussagen gemacht werden können.

Oxidische Erze

Da Nickel überwiegend zur Herstellung von Edelstahl bzw. Eisen-Nickel-Legierungen verwendet wird und Eisen ein natürlicher Begleiter in den Lateriten ist, werden lateritische Nickelerze lediglich bis zu dem Zwischenprodukt Ferronickel verarbeitet. Dabei handelt es sich um eine nickelhaltige Eisenlegierung, die ohne weitere Aufbereitung der Stahlherstellung zugeführt werden kann, weswegen die oxidischen Erze bevorzugt zur Produktion von rostfreien Stählen verwendet werden. Je nach eingesetztem Verfahren kann aus den oxidischen Lateriten zusätzlich der Kobaltanteil (ca. 0,3 %) gewonnen werden.

Obwohl ein relativ hoher Energieaufwand¹⁷ erforderlich ist, werden lateritische Nickelerze ohne Aufbereitung in den Verhüttungsprozess gebracht, da eine entsprechende Aufkonzentrierung mit physikalischen Methoden bisher nicht möglich ist. Die zahlreichen zur Verfügung stehenden Verfahren zur Verhüttung richten sich nach dem Roherztyp:

1. Pyrometallurgische Verarbeitung von silikatischen Nickellateriten zu Ferronickel:

Zuerst werden die silikatischen Nickellaterite im Drehrohrofen getrocknet und vorreduziert. Anschließend wird das Zwischenprodukt durch Elektroschmelze reduziert und dadurch Ferronickel (15-35 % Nickel) erzeugt¹⁸. Das Reduzieren

¹⁷ Im Vergleich zu sulfidischen Erzen wird ca. die zwei- bis dreifache Energiemenge benötigt (Kerfoot 1991).

¹⁸ Beim Schmelzen bzw. Verblasen von Ferronickel kann Nickelstein erzeugt werden, der in der Verfah-

erfolgt durch Zugabe von Reduktionsmittel in die Elektroöfen. Als Zwischenprodukt erhält man Luppen aus Ferronickel (22 % Nickel). Beimengungen von Kohlenstoff, Schwefel, Silizium und Phosphor werden i. d. R. im Pflannenofen durch Zugabe von Soda bzw. Sauerstoff oder Eisenerz beseitigt. Es wird davon ausgegangen, dass infolge der reduzierenden Ofenatmosphäre Kohlenmonoxid-Emissionen freigesetzt werden.

2. Hydrometallurgische Verarbeitung von oxidischen Nickellaterite (Limonite) zu Nickeloxidsinter:

Nach Trocknen in Trockentrommeln, Kalzinieren und Reduzieren in Etagenöfen erfolgt eine ammonalkalische Laugung und Fällung als Aminkomplex. Schließlich erfolgt die Sinterung zu Nickeloxidsinter.

Umweltbelastungen und Materialverluste

Sulfidische Erze: Betrachtet man die Vielzahl der möglichen Verfahren zur Verhüttung von Nickelsulfiden, so sind grundsätzlich alle von ihnen ökologisch sauber betreibbar und erlauben eine hohe Ausnutzung der Nickelrohstoffe (Hilbrans / Hinrichs 1999). Relevante Unterschiede von Verfahrenslinien liegen weniger in der Wahl der Energieträger als vielmehr in den umgesetzten Materialmassen, die direkt durch den Nickelgehalt der eingesetzten Erze bestimmt werden. Die Auswahl eines Verfahrens für eine spezifische Mine ist bei gegebener Erzqualität primär eine betriebswirtschaftliche Entscheidung (Hilbrans / Hinrichs 1999).

Als zentrales Umweltproblem sulfidischer Nickelerze werden die Emissionen von Schwefeldioxid während der Verhüttung angesehen (Kerfoot 1991), die beim Rösten und Verblasen freigesetzt werden (Hilbrans / Hinrichs 1999, siehe auch **Abb. V-2**). Obwohl moderne Verhüttungstechnik eine befriedigende Abscheidung des Schwefeldioxids erlaubt, fehlt es Öfteren eine ausreichende Nachfrage nach Schwefelsäure in entsprechender Transportdistanz (insbesondere für abgelegene Anlagen), so dass das Schwefeldioxid mangels Abscheidung in die Atmosphäre freigesetzt wird. Zu beachten ist auch, dass derartige Abscheidung in einigen Anlagen zusätzlichen – i. d. R. fossilen – Brennstoff benötigt (Kerfoot 1991). Neben diesem *end-of-pipe*-Ansatz kann man auch den Schwefelinput in die Prozesse minimieren, indem man den Eintrag des Pyrrhotins, das Hauptträger des Schwefels ist, durch Abtrennung bestmöglich unterbindet (Schwefeldioxid-Reduktion bis zu ca. 50 %). Dieses Verfahren ist kostspielig, die Nickelausbringung wird verringert und darüberhinaus wird eine Energiequelle entfernt, welche den Schmelzprozess unterstützt, so dass zusätzliche Energie eingesetzt werden muss (Kerfoot 1991). In früheren Jahren wurde das Pyrrhotin-Konzentrat durch Inco verhüttet und damit Nickel gewonnen, doch infolge strengerer Schwefelsäureemissionsbeschränkungen wurde dieses Verfahren mangels Rentabilität bereits in

renslinie der Nickelsulfide als Prozessinput zu Nickelstein weiterverarbeitet werden kann. Diese Produktionslinie spielt jedoch insgesamt nur eine untergeordnete Rolle.

den 1980er Jahren eingestellt (Kerfoot 1991).

Daneben treten folgende weitere Emissionen in Luft auf wie andere saure Gase, Stickoxide, Schwermetalle (einschließlich deren Verbindungen), Chlorgas, flüchtige Kohlenwasserstoffe (VOC), Kohlenmonoxid und Carbonyle, aber auch Staub (EC 2001). Die wichtigsten Emissionen in Wasser sind Metalle und deren Verbindungen, insbesondere von Kupfer, Nickel, Kobalt, Arsen und Chrom, daneben auch Fluoride, Sulfate und Chloride (EC 2001).

Die Nickelverluste sind abhängig vom Grad des Oxidationsprozesses während dem Rösten; ein hoher Röstgrad erhöht den Nickelgehalt in der Nickelmatte (infolge überproportionaler Oxidation und anschließender Entfernung des Eisens), jedoch wird dadurch auch mehr Nickel oxidiert. Mit den Eisenoxiden gelangen also auch Nickeloxide beim Schmelzen in die Schlacke und erhöhen damit den Nickelverlust (Kerfoot 1991). Zusätzlich kann Nickelmatte in Form von kleinen Einschlüssen in die Schlacke gelangen. Aufgrund des Vorhandenseins von residualen Eisensulfiden in der Schmelze geht schließlich nur „eine kleine Menge“ Nickel in die Schlacke verloren (Kerfoot 1991). Die Schlacke des Konverterprozesses wird aufgrund ihrer relativ hohen Nickelkonzentration in den Schmelzprozeß zurückgeführt sogenannte „Retourschlacke“ (ca. 2-3 % Nickel); hingegen verbleibt ein geringer Nickelanteil in der Absetzschlacke der Schmelzprozesse (0,1-0,3 % Nickel).

Bei der Aufbereitung der sulfidischen Nickelerze wird das Primärausbringen zu 91 % angegeben; der Nickelverlust beträgt also 9 % (aufgrund der relativ intensiven Aufbereitung von Koppelprodukten) (Hilbrans / Hinrichs 1999). Ein Großteil dieser Fraktion kann jedoch über Zwischenprodukte durch Sekundärproduktion rückgewonnen werden. In diesen Fällen handelt es sich also nicht im eigentlichen Sinn um Nickelverluste.

Sulfidische und oxidische Erze: Die festen Reststoffe sind im Rahmen der Lagerung generell relativ gering umweltbelastend, da die Gewinnung des Nickels eine aggressive Behandlung erfordert und potentiell umweltbelastende Stoffe bereits weitgehend herausgelöst sind (bzw. entsprechend stabil gebunden) (Hilbrans / Hinrichs 1999).

Die Nickelverluste aus pyrometallurgischen Prozessen oxidischer Erze bis zu Ferronickel betragen über die Schlacken ca. 5 %. Die Schlacken enthalten dadurch ca. 0,1-0,2 % Nickel (Kerfoot 1991, Hilbrans / Hinrichs 1999). Die Nickelverluste aus hydrometallurgischen Prozessen konnten nicht ausreichend ermittelt werden. Im *chloride leach process* wird die Gesamtextraktion zu 90 % angegeben (Kerfoot 1991), woraus ein Verlust als Rückstand aus den Laugeprozessen von ca. 10 % geschlossen wird. Dies wird als Durchschnitt für die hydrometallurgischen Prozesse angenommen.¹⁹

Bei der Aufbereitung der lateritischen Nickelerze wird das Primärausbringen zu 92 %

¹⁹ Da ein durch Stoffflussanalyse ermittelter Wert des *Stocks and Flows (STAF)*-Projektes vorlag (Reck / Gordon 2008), wurde zur Wahrung der Konsistenz auf eine eigene Berechnung der Verluste in die Schlacken verzichtet.

angegeben; der Nickelverlust beträgt also lediglich 8 % (Hilbrans / Hinrichs 1999). Die Nickelverluste in die Schlacken bei der Gewinnung von Primärnickel wurden für das Jahr 2000 zu 74.000 t bestimmt (Reck / Gordon 2008).

Tab. V-3: Umweltbelastungen und jährliche Materialverluste bei der Nickelverhüttung

Nickelerz (Mineral)	Umweltbelastung	Materialverluste	Bemerkungen
Sulfidische Erze	Emissionen in die Luft: Kohlendioxid ca. 3,3 t/t Nickel, saure Gase, Chlorgas, Stickoxide, flüchtige Kohlenwasserstoffe, Carbonyle, Flugstaub 0,28 t/t Nickel; Emissionen in Wasser: Metalle und deren Verbindungen, das sind Kupfer, Nickel, Kobalt, Arsen, Chrom, Fluorid, Sulfate und Chloride; Schwefelsäure 8,3 t/t (ggf. Schwefeldioxid-Emissionen von Hütten); Anodenschlamm 0,11 t/t Nickel (Schwermetalle und deren Verbindungen); Laugereirückstände 0,03 t/t Nickel; Energiebedarf 71 GJ/t Nickel.	9 %, bezogen auf Nickelinhalt in den Konzentraten	
Laterite, Nickeloxide	Kohlendioxid ca. 29 t/t Nickel; Laugereirückstände 9,65 t/t Nickel; Flugstaub 1,05 t/t Nickel; Pyrometallurgie: ggf. Kohlenmonoxid-Emissionen; Energiebedarf 530 GJ/t Nickel.	Pyrometallurgie: 5 %; Hydrometallurgie: 10 %; Gesamt: 8 % (bezogen auf Nickelinhalt in den aufbereiteten Erzen).	Übertragbarkeit auf alle Laugungsprozesse unsicher
„durchschnittliche Weltproduktion“ (Hilbrans / Hinrichs 1999)	Kohlendioxid ca. 16 t/t Nickel; Schwefelsäure 4,4 t/t Nickel; Laugereirückstände 4,5 t/t Nickel; Flugstaub 0,7 t/t Nickel; Schlacke 24 t/t Nickel; Energiebedarf 287 GJ/t Nickel.	74.000 t	
Mixed (integrated) production process: Nickel and Copper Plant, Norway (Bezugsjahr 2006) ²⁰	Emissionen in Luft / in Wasser [kg/t Metall Kupfer plus Nickel]: - Cd 0,0002/0,0005 - Hg 0,000003/0,000003 - Pb 0,0002/0,0002		

V.2.4. Raffination

Gemäß dem Verwendungsmuster von Nickel bestehen keine hohen Reinheitsanforderungen an die Produktion für die Hauptanwendungen (im Vergleich zu beispielsweise

²⁰ Nach einem Bericht der OSPAR-Kommission zur Übersicht von Cadmium, Quecksilber- und Blei-Emissionen während der Primärproduktion von Nichteisenmetallen in europäischen Ländern (OSPAR 2008).

Kupfer). So enthalten die Nickelprodukte Ferronickel und Nickeloxid, die aus lateritischen Erzen gewonnen werden, gewisse Unreinheiten wie Kobalt, Kupfer und weitere Spurenstoffe, da sie nach den Schmelzprozessen nicht weiter raffiniert wurden. Diese Nickelprodukte (class II) sind ausreichend rein zur Produktion von rostfreiem Stahl (*stainless steel*) (Kerfoot 1991).

Für einige Anwendungen sind jedoch hochreine Nickelprodukte (class I) erforderlich, wie Elektrolysekathoden, Carbonylpulver und wasserstoffreduziertes Pulver. Sie werden ausgehend von sulfidischen Erzen hergestellt. Mithilfe der Raffination kann man einerseits die vorhandenen Unreinheiten entfernen, um die gewünschte Nickelqualität zu erhalten, andererseits um daraus hochwertige Edelmetalle und Platingruppenmetalle zu gewinnen (Kerfoot 1991). Als primäre Nickelprodukte werden heutzutage Kathoden, Granalien, Pulver, Briketts, Rondellen gehandelt,

Zu den Raffinationsmethoden gehören Elektroraffination und *electrowinning*, zwei wichtige Methoden auf Basis der Galvanik zur Reinigung von Nichteisenmetallen; Alternativen dazu sind die Carbonylraffination (in Kombination mit dem Langer-Mond-Prozeß) und die Wasserstoffreduktion, bei der Nickelpulver hergestellt wird. Bei den Carbonyl-Verfahren können Verbindungen wie das organische Nickeltetracarbonyl ($\text{Ni}(\text{CO})_4$), ein Zwischenprodukt des Mond-Verfahrens, Umweltbelastungen bewirken. Zur Elektrolyse wird Energie zwischen 3,0 und 3,3 kWh/kg Nickel benötigt (Hirschberg 1999). Die Umweltbelastungen und Nickelverluste während der Raffination sind in der vorliegenden Fachliteratur nicht dokumentiert; die Nickelverluste werden als vernachlässigbar eingeschätzt.

Tab. V-4: Umweltbelastungen und jährliche Materialverluste bei der Nickelproduktion. Dargestellt sind die Produkte aus verschiedenen alternativen Raffinationsmethoden (Primärnickel)

Produkt	Umweltbelastung	Materialverluste	Bemerkungen
Elektrolysekathoden	3,0-3,3 kWh/kg Nickel; sonst unbekannt	vernachlässigbar	
Carbonylpulver	Nickeltetracarbonyl; sonst unbekannt	vernachlässigbar	
wasserstoffreduziertes Pulver	unbekannt	vernachlässigbar	

V.2.5. Produktion nickelhaltiger Produkte / Rückgewinnung von Neuschrotten

Primärproduktion: Da Nickel zum Einsatz fast ausnahmslos weiterverarbeitet werden muss, ist die chemische Reinheit marktrelevant. Hochreines Nickel > 99,7 % (class I) umfasst elektrolytische Kathoden, Carbonylgranulat (*carbonyl refined granules*), Carbonylpulver sowie wasserstoffreduziertes Nickelpulver/Nickelbrikett, Pellets und Rondelle. *Wrought nickel* hat einen Nickelgehalt von mindestens 99,0 %. Weniger rein sind diverse Grade von Ferronickel und Nickeloxid (class II).

Weltweit wird mehr als 60 % der Primärnickelproduktion in Edelstählen²¹ eingesetzt (Nickel Institute 2009). Weitere wichtige Verwendungen sind Nichteisenlegierungen (12 %) sowie die Galvanotechnik (11 %) (Kuck 2009). Darüberhinaus werden zahlreiche Nickellegierungen und Nickel-Halbwaren produziert (ca. 13 %). Nach einer starken Wachstumsphase über mehrere Jahre macht der Einsatz von Nickel in Batterien bereits knapp 5 % des globalen Nickeinsatzes aus (Kuck 2009).

Sekundärproduktion: Nickelführende Neuschrotte von Formprozessen sind eine wichtige Quelle des Inputmaterials für die Produktion nickelhaltigen rostfreien Stahls. Nickel-führende Schrotte umfassen die Kategorien Edelstahl (*stainless steel*), Superlegierungen, Kupfer-Nickel-Legierungen und (reines) Nickel; die Schrotte einer Kategorie werden zum Recycling in solche Produktionsanlagen gebracht, die dieselbe Materialkategorie verarbeiten (Kerfoot 1991).

Die gesamte Produktion (Primär- und Sekundärproduktion) des Nickels inklusive seiner Legierungen und Verbindungen wurde für das Jahr 2000 zu 1,473 Mt bestimmt. Dabei fallen ca. 180.000 t Neuschrotte an, die weitestgehend rezykliert werden können, sowie Nickelverluste in Form von Industrieabfällen zu 15.000 t (Reck / Gordon 2008), also lediglich 1 % der Produktionsmenge (Kap. V.2.7). Der Input durch Schrotte (Neu- und Altschrotte) wurde summarisch zu 549.000 t bestimmt. Alle Angaben beziehen sich auf das Jahr 2000.

Nickellegierungen

Nickellegierungen werden aufgrund ihrer hohen Korrosionsbeständigkeit, speziellen physikalischen Eigenschaften und herausragenden Hochtemperaturbeständigkeit eingesetzt (Strassburg 1991); häufige Legierungselemente sind dabei Chrom, Kupfer, Eisen, Molybdän, Titan, Wolfram, Niob und Aluminium. Die Legierungen sind standardisiert (ASTM²² Standard bzw. DIN²³).

Weltweit wird Nickel in Kupfernickel für Münzen eingesetzt, üblicherweise mit einem Gehalt von 25 % Nickel, dem Rest Kupfer.

Nickelverbindungen

Die zahlreichen Nickelverbindungen machen lediglich ca. 3 % der Nickelproduktion aus (ausgenommen Ferronickel und Nickeloxide, welche in der Metallurgie eingesetzt werden). Haupteinsatzgebiete sind die Galvanotechnik, die Katalyse, Batterien und Pigmente.

Umweltbelastung und Materialverluste

Bei der Verarbeitung von Nickel kommt es verfahrensabhängig zu Materialverlusten.

²¹ Der Anteil der nickelführenden Stähle an den Edelstählen beträgt 62 % (nach Kuck 2009).

²² American Society for Testing and Materials

²³ Deutsches Institut für Normung

Grundsätzlich hängen diese vom jeweiligen Produkt ab und können nicht pauschal angegeben werden. Reste (Stanzreste, Späne etc.) können jedoch in der Regel gut recycelt werden. Größere Verluste treten vor allem bei spanenden Verfahren auf wie Drehen, Fräsen und Schleifen. Bei diesen Verfahren ist aufgrund der großen Zerspanungsarbeit auch von einem besonders hohen Energieverbrauch auszugehen. Bei anderen Umformungsverfahren sind die Materialverluste in aller Regel deutlich geringer als bei diesen spanenden Verfahren.

Das Aufkommen von Neuschrotten wurde für das Jahr 2000 zu insgesamt 180.000 t bestimmt, welche ohne bedeutende Verluste zurück in die Produktion (in der Regel: Stahlproduktion) geführt werden (Reck / Gordon 2008). Das Nickel gebunden in Stahl wird quasi vollständig recycelt (Müller / Graedel 2003); dies kann dadurch begründet werden, dass die nickelführenden Stahlsorten relativ wertvoll sind und dadurch das Recycling hoch entwickelt ist (siehe Kap. V.2.7).

Tab. V-5: Umweltbelastung und jährliche Materialverluste bei der Produktion von Nickelprodukten, hier: Endprodukte ohne Einsatz im Stahl

Anwendungsbereich	Produkt	Umweltbelastung	Materialverluste	Bemerkungen
Durchschnitt Endprodukte (ohne Einsatz im Stahl)	Nickel (99,5 %, „ab Fabrik“)	Treibhausgasemissionen: 11,2 kg CO ₂ äq/kg Nickel; Kumulierter Energieaufwand (KEA)(ProBas 2010): 194 MJäq/kg Nickel	vernachlässigbar	

V.2.6. Nutzung

Der weltweite Nickelverbrauch betrug im Jahr 2009 1,241 Mt (Primärnickel) (INSG 2011), der deutsche Verbrauch 80.100 t Raffinadenickel (BGR 2010).

Im Rahmen einer Stoffflussanalyse wurde der Nickelhaushalt für das Jahr 2000 untersucht (Reck / Gordon 2008): Der weltweite Nickelverbrauch betrug im Jahr 2000 1,473 Mt, zeitgleich wurden insgesamt 604.000 t Nickel (41 % bezogen auf den Inputfluss) nach deren Nutzung entsorgt.

Der Gesamtverbrauch setzt sich aus Primärnickel und Sekundärnickel (recyciertes Nickel) zusammen; im Jahr 2000 deckte Sekundärnickel ca. ein Drittel des Gesamtverbrauchs (Reck / Gordon 2008). Im Jahr 2007 betrug der weltweite Primärnickelverbrauch 1,32 Mt (nach Kuck 2009). Der größte Verbraucher von Primärnickel war 2007 die Stahlindustrie²⁴, deren Nachfrage sich wie folgt aufteilte: EU (234.000 t), China (227.000 t) und Japan (113.000 t).

Die Endnutzung teilt sich auf zahlreiche Anwendungen auf, von denen die wichtigsten

²⁴ Die globale Edelstahlproduktion betrug 27,8 Mt im Jahr 2007 (nach Kuck 2009).

sind: Gebrauchsgüter (Haushaltsartikel, Fässer/Tanks, Münzen, Batterien), gefolgt vom Maschinenbau sowie der Fahrzeugindustrie (Bezugsraum: westliche Welt, 1987) (Kerfoot 1991, Hilbrans / Hinrichs 1999). Superlegierungen mit Nickelanteilen sind wichtige Materialien zur Herstellung von Flugzeugturbinen (Kuck 2009). Die Nachfrage nach Nickelschaum und Spezial-Nickelmetallpulver für Akkumulatoren stieg in den vergangenen Jahren weltweit stark an, da die meisten Fahrzeuge mit Hybridmotoren zur Zwischenspeicherung von Energie Nickelmetallhydrid-Akkumulatoren verwenden (in den Vereinigten Staaten) (Kuck 2009).

Nickel ist bei den meisten Einsatzbedingungen stabil und weist keine relevanten dissipativen Verluste während der Nutzungsphase auf. Die Lebensdauer der meisten Nickelprodukte, insbesondere im Maschinenbau und in Fahrzeugen, ist relativ lang und kann 20 oder mehr Jahre erreichen. Eine Ausnahme bilden Batterien und Akkus, deren Lebensdauer im Allgemeinen wesentlich kürzer und bei denen mit einem hohen Anteil an dissipativen Verlusten zu rechnen ist.

V.2.7. Recycling nickelhaltiger Produkte/Abfälle

Zu unterscheiden sind:

1. die Rückgewinnung von metallischem Nickel sowie Nickellegierungen (reine Rezyklierung),
2. die Rückgewinnung von nickelhaltigen Edelstählen als Edelstahl (im Allgemeinen Vermischung),
3. die Rückgewinnung von nickelhaltigen Stählen in niedrigwertigere Stahllegierungen („downcycling“), in denen Nickel weitestgehend nicht mehr (als solches) genutzt wird.

Ein Recycling von Nickel ist teilweise etabliert. In den Vereinigten Staaten beträgt der Anteil von Sekundärnickel am Gesamtverbrauch 38 % (Kuck 2009).

Bezogen auf das Recyclingvolumen wird am meisten Nickel in Form von Stählen rückgewonnen, das bedeutet (2) und (3) dominieren. Bei der technischen Rückgewinnung bleibt Nickel vollständig im Stahl erhalten, da keine Verluste in die Schlacke auftreten (Müller 2003). Verluste kommen dadurch zustande, dass einerseits nickelhaltige Stähle bzw. Nickelprodukte statt dem Recycling zugeführt teilweise deponiert werden, andererseits mit niedrigwertigen Stahlsorten vermischt werden, so dass eine spätere stoffliche Nutzung des Nickels unterbunden wird („downcycling“). Hingegen sind bei der Rezyklierung von metallischem Nickel sowie hochwertigen Nickellegierungen nur relativ geringe Materialverluste zu erwarten. Nickelhaltige Batterien und Akkumulatoren werden häufig nicht rezykliert, allerdings machen diese lediglich ca. 5 % am Verbrauch aus.

In den USA trugen Schrotte in den 1980er Jahren ca. 40 % des Nickels bei, der zur Produktion von Edelstahl eingesetzt wird, ohne die werksinternen Schrotte der Produk-

tionsanlagen zu berücksichtigen (Kerfoot 1991). Eine wichtige Rolle hat dabei die INMETCO²⁵ gehabt, die nickelhaltige Abfälle aus der Spezialstahlproduktion sammeln und in Edelstahl umschmelzen (in den 1980er Jahren ca. 40.000 t/a). INMETCO schmelzt verschiedene Schrottqualitäten um, daneben auch Flugaschen, Glühspan und Drehbankspäne. 1985 begann auch Falconbridge, nickel- und kobaltführende Legierungen in ihren Primärnickelhütten rückzugewinnen (Kerfoot 1991). Zur Nutzung der Schrotte in Deutschland liegen keine Angaben vor.

Umweltbelastung und Materialverluste

Mithilfe der ausgewerteten Fachliteratur konnten hinsichtlich des Recyclings nickelhaltiger Wertstoffe keine Umweltbelastungen spezifiziert werden. Insgesamt wurden im Jahr 2000 von den 604.000 t Nickel, das entsorgt wurde, 350.000 t Nickel in Form von Altschrotten relativ hochwertig rezykliert, was einer Rückgewinnungsrate von 58 % entspricht. Vom übrigen Nickel gelangen ca. 87.000 t (14 %) in Rezyklierprozesse anderer Metalle, z.B. niedrigwertigeren Stahl und Kupferlegierungen („downcycling“), wo sie Großteils „entwertet“ werden, und weitere ca. 181.000 t (30 %) gehen an die Deponien verloren (Reck / Gordon 2008).

Weitere 15.000 t gelangen als Abfälle aus der Produktion in die Abfallbehandlung (Reck / Gordon 2008).

Tab. V-6: Umweltbelastung und jährliche Materialverluste beim Recycling nickelhaltiger Produkte/Abfälle

Rezyklierter Stoffstrom	Umweltbelastung	Materialverluste
Neuschrotte	unbekannt	268.000 t, davon: 181.000 t in Deponien, 87.000 t „downcycling“
(Alt-)Schrotte		

V.2.8. Nickel in die Deponien

Von den rostfreien Stählen und Nickellegierungen gelangen nur relativ geringe Mengen Nickel in die Deponien; der überwiegende Teil wird recycelt. Die Nickelmenge, welche im Jahr 2000 in Form von Stählen, weiteren nickelhaltigen Legierungen oder als reines Nickel in die Deponien verbracht wurde, beläuft sich auf 181.000 t (Reck / Gordon 2008).

Nickel ist weitgehend korrosionsresistent gegen Luft und nichtoxidierende Säuren, und insbesondere auch gegen Laugen. Unter den Bedingungen einer Deponie ist es weitgehend inert. Umweltbelastungen konnten nicht spezifiziert werden.

²⁵ International Metals Reclamation Company, Ellwood City, Pennsylvania

V.2.9. Nickel in die Umwelt und andere Senken

Bei Nickel und den nickelführenden Stählen überwiegt die nicht-dissipative Nutzung. Der größte Teil des Nickels wird rezykliert, wiedergewonnen und wiederverwendet. Aufgrund nicht ausreichender Datenlage ist eine Abschätzung für die jährlich in die Umwelt freigesetzten Mengen an Nickel nicht möglich. Eine Akkumulation von Schwermetallen wie Nickel im Klärschlamm kann gegenüber landwirtschaftlichen Flächen schädlich sein.

Eine Quantifizierung der Flüsse in die Umwelt war auf Basis der vorliegenden Fachliteratur nicht möglich.

V.3. Fazit

V.3.1. Verbesserungspotential

Eine bedeutende Umweltbelastung der sulfidischen Erze sind die Schwefeldioxid-Emissionen. Zwar wurde diese Belastung durch Verarbeitung zu Schwefelsäure und anschließenden Verkauf teilweise gemindert, doch nach wie vor wird Schwefelsäure in aquatische Systeme emittiert, wo diese Möglichkeit nicht genutzt wird. Daneben geht vom Abraum und den Abgängen der Aufbereitung eine Gefahr des *acid mine drainage*⁶ aus, die die Vorfluter bedroht.

Demgegenüber ist die Gewinnung aus lateritischen Erzen weniger mit derartigen Belastungen verbunden, doch mit einem ungefähr dreifachen Energieaufwand. Außerdem bewirkt der Abbau der lateritischen Erze im Tagebau eine hohe Flächeninanspruchnahme und damit einen weiträumigen Eingriff in die Landschaft. Der TMR für Nickelmetall ist mit 100-200 t/t relativ hoch.

Zur nachsorgenden Verringerung der Umweltbelastung durch *acid mine drainage* kann die Verwendung der nicht verwerteten Extraktion und der Aufbereitungsrückstände als Versatzmaterial im Tiefbau, eine fachgerechte Deponierung (eingekapselt) oder die Einbindung von Basenträgern in die Deponien eingesetzt werden. Diese Maßnahmen sind mit zusätzlichem Material- und Energieaufwand verbunden.

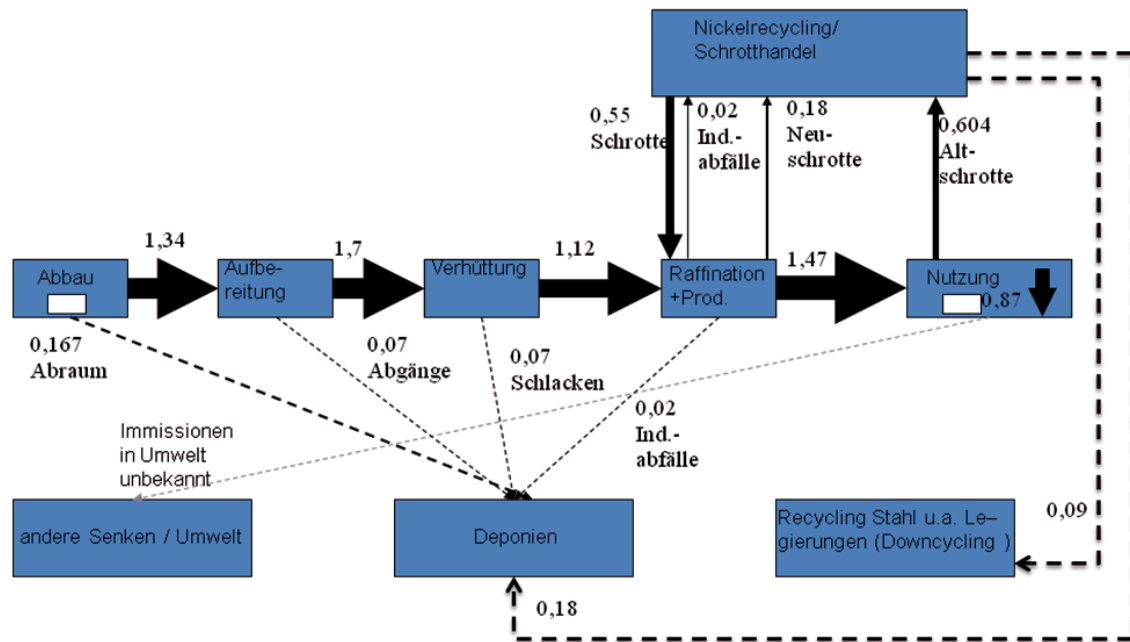
Hinsichtlich des Energieverbrauchs bei der Herstellung von Nickel liegen die hauptsächlichen Einsparungspotentiale bei der metallurgischen Gewinnung und Herstellung; der Energieverbrauch im Bergbau und der Aufbereitung macht lediglich 7 % des gesamten Energiebedarfs aus (Hilbrans / Hinrichs 1999).

Das Nickelstoffflusssystem der Welt ist für das Jahr 2000 in **Abb. V-1** abgebildet; wo keine Werte für das Jahr 2000 verfügbar waren, wurde auf jüngere oder ältere Werte ausgewichen und das entsprechende Bezugsjahr in Klammern vermerkt. Entscheidende Verluste (> 10 %) treten jeweils bei der Gewinnung und nach der Nutzung auf. Jährlich gelangen durch diese und die anderen Prozesse insgesamt ca. 500.000 t Nickel in die Deponien (das entspricht 30-40 % des als Primärressource gewonnenen Nickels). Eine Möglichkeit, die Verluste bei den sulfidischen Konzentraten zu verringern wäre eine Absenkung des Röstgrades. Dies würde geringere Nickelgehalte der Konzentrate und damit prinzipiell einen höheren Aufbereitungsaufwand bedeuten, auch energetisch. Dies könnte in einer spezifischen Untersuchung näher untersucht werden, vermutlich für verschiedene sulfidische Erztypen.

Des Weiteren werden zur Verminderung der Nickelverluste bei der Aufbereitung sulfidischer Erze angeführt: feineres Mahlen von verwachsenen Erzen, Einsatz anderer Flotationschemikalien und die Erzeugung von Sammelkonzentraten.

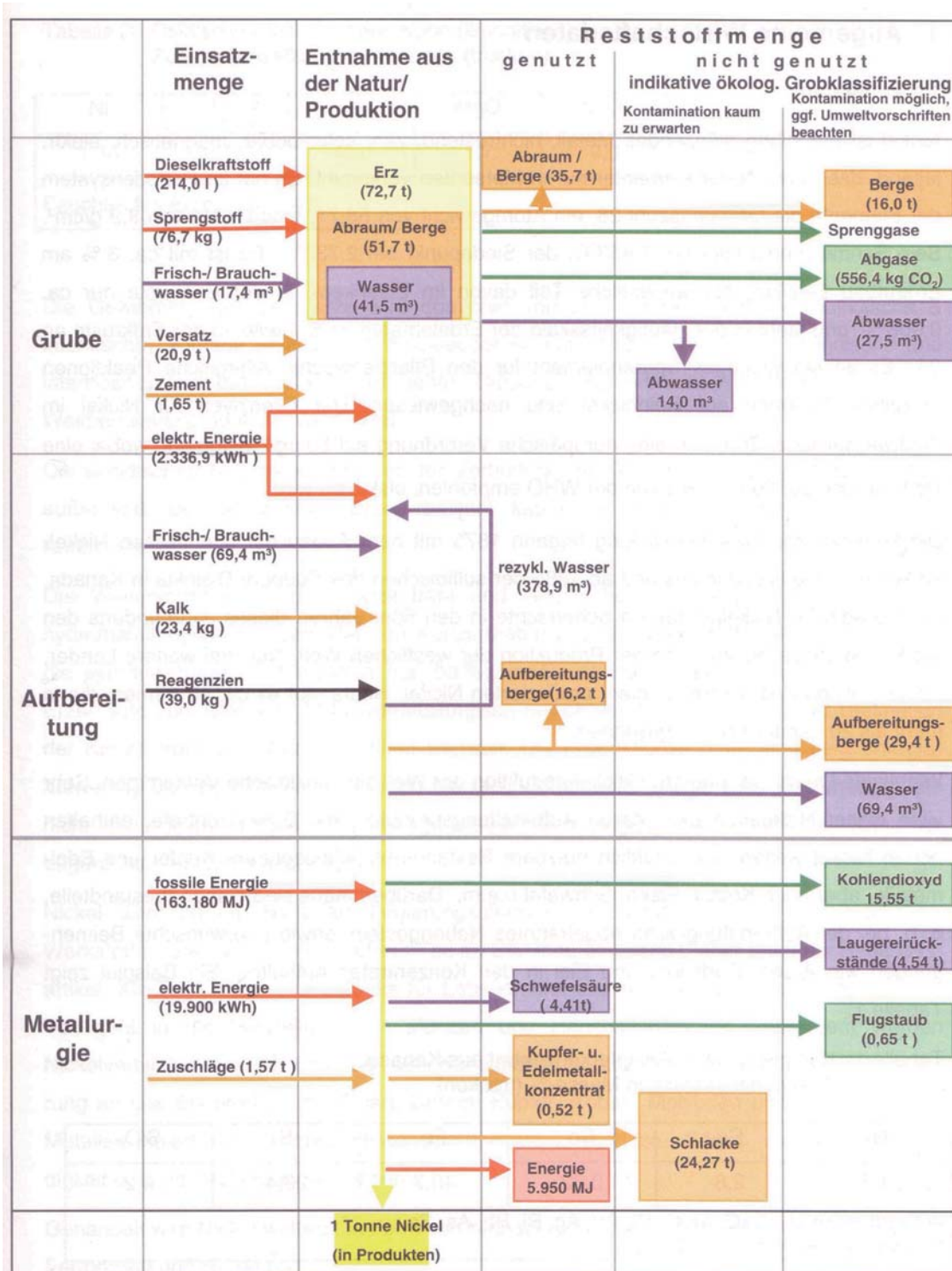
Eine deutliche Verminderung der Umweltbelastungen durch die Nickelproduktkette ist letztlich nur über einen effizienteren Einsatz in Vor- und Fertigprodukten möglich, die die Nachfrage nach diesem Metall verringern.

Abb. V-1: Globales Stoffhaushaltssystem Nickel (Nickelmetall), Bezugsraum: Welt, Bezugsjahr 2000, Ausnahme Aufbereitung→Verhüttung: Bezugsjahr 2007; Angaben in Mio. Tonnen.



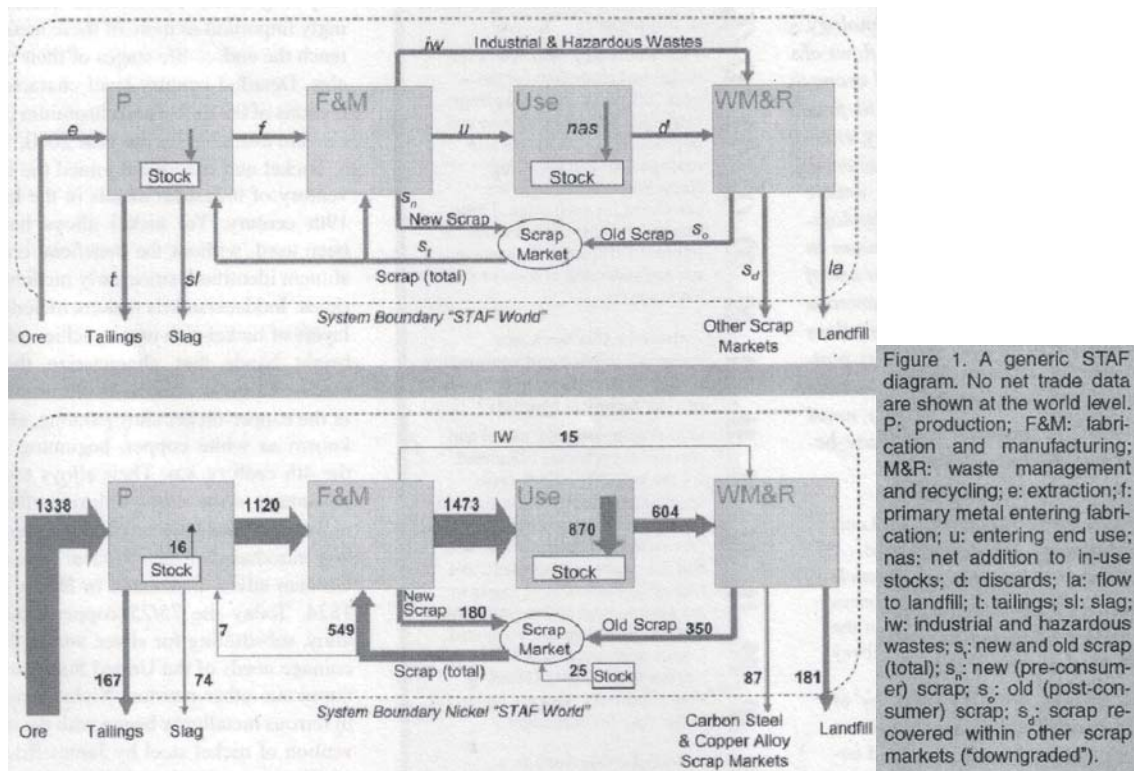
Quelle: eigene Darstellung auf Basis dieser Studie und von Reck und Gordon (2008)

Abb. V-2: Stoffmengenflüsse und Energieverbrauch – Bergbau, Aufbereitung und Metallurgie. Die Auswertung erfasst ca. 70 % der Weltnickelproduktion



Quelle: Hilbrans und Hinrichs (1999)

Abb. V-3: Globales Stoffhaushaltssystem Nickel nach Resultaten des *Stocks and Flows-Projektes*, Bezugsraum: Welt, Bezugsjahr 2000; Angaben in 1.000 t/a



Quelle: Reck und Gordon (2008)

V.3.2. Methodische Schwierigkeiten

Relevante Datenlücken

Eine Quantifizierung der Umweltbelastungen, insbesondere aus der Nickelproduktion, ist auf Basis der vorliegenden Literatur ausgesprochen schwierig, da eine Vielzahl von Prozesskombinationen möglich ist und bei deren Einsatz in den Förderländern zum Teil sehr unterschiedliche Umweltstandards Anwendung finden.

V.4. Referenzen

- BGR [Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe] (2010): Bundesrepublik Deutschland – Rohstoffsituation 2009. Rohstoffwirtschaftliche Länderstudien, Heft XXXIX; Hannover
- EC [European Commission] (2001): Reference Document on Best Available Techniques in the Non Ferrous Metal Industries. Integrated Pollution Prevention and Control (IPPC). Zusammenfassung in deutscher Übersetzung (December 2001)
- Hilbrans, H. / Hinrichs, W. (1999): Stoffmengenflüsse und Energiebedarf bei der Gewinnung ausgewählter mineralischer Rohstoffe: Teilstudie Nickel. Geologisches Jahrbuch, Sonderhefte Reihe H, Heft SH7. Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe und Staatliche Geologischen Dienste in der Bundesrepublik Deutschland (Hg.); Stuttgart: E. Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung
- Hirschberg, H. G. (1999): Handbuch Verfahrenstechnik und Anlagenbau: Chemie, Technik, Wirtschaftlichkeit; Berlin: Springer-Verlag
- IPCS/CEC (2010): International Chemical Safety Cards (ICSC): Nickel. GESTIS-Stoffdatenbank;
http://biade.itrust.de/icscde/lpext.dll/Infobase/n/icsc0062_ger.htm?f=templates&n=print-frame.htm&up=1&2.0 (20.04.2010)
- INSG [International Nickel Study Group] (2011): Statistics: Primary Nickel Usage (Revision date: 24.01.2011); <http://www.insg.org/stats.aspx> (10.02.2011)
- Kawamoto, H. (2008): Japan's Policies to be adapted on Rare Metal Resources. *Quarterly Review*, Vol. 27, 57-76
- Kerfoot, D. G. E. (1991): Nickel; in: Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry, Vol. A 17, 5th, completely revised edition; Weinheim, Basel, Cambridge, New York, 157-219
- Kuck, P. H. (2009): Mineral Commodity Summaries: Nickel (January 2009). U. S. Geological Survey
- Kuck, P. H. (2009): Minerals Yearbook 2007: Nickel [Advance Release] (October 2009). U. S. Geological Survey
- Lascelles, K. / Nicholls, D. (1991): Nickel Compounds; in: Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry, Vol. A 17, 5th, completely revised edition; Weinheim, Basel, Cambridge, New York, 23-249

- Müller, D. / Graedel, T. E. (2003): Model Development for the Global Cycles of Iron and Its Alloying and Coating Elements. Workshop Report of NSF project MUSES, 06.-08.02.2003; unpublished
- Murawski, H. (1992): Geologisches Wörterbuch. 9., völlig überarbeitete und erweiterte Auflage; Stuttgart: Ferdinand Enke Verlag
- Nickel Institute (2009): Nickel and its uses; <http://www.nickelinstitute.org/8/index1.shtml> (26.05.2009)
- Nriagu, J. O. / Pacyna, J. M. (1988): Quantitative assessment of worldwide contamination of air, water and soils by trace metals. *Nature*, Vol. 333, 134-139
- OSPAR (2008): Overview Assessment: Implementation of OSPAR Recommendation 98/1 concerning Best Available Techniques and Best Environmental Practice for the Primary Non-Ferrous Metal Industry (Zinc, Copper, Lead and Nickel Works). Hazardous Substance Series, 348/2008
- Pohl, W. L. (2005): Mineralische und Energie-Rohstoffe. Eine Einführung zur Entstehung und nachhaltigen Nutzung von Lagerstätten. W. und W. E. Petraschek's Lagerstättenlehre. 5. Auflage; Stuttgart: E. Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung, 527 Seiten
- ProBas [Prozessorientierte Basisdaten für Umweltmanagement-Instrumente] (2010): Datenbankabfrage der Datenbank ProBas; <http://www.probas.umweltbundesamt.de/php/index.php> (Dezember 2010)
- Reck, B. K. / Gordon, R. B. (2008): Nickel and Chromium Cycles: Stocks and Flows Project Part IV. *The Journal of The Minerals, Metals & Materials Society*, July 2008, 55-59
- Reck, B. K. / Müller, D. B. / Rostkowski, K. / Graedel T. E. (2008): Anthropogenic Nickel Cycle: Insights into Use, Trade, and Recycling. *Environ. Sci. Technol.*, Vol. 42, Nr. 9, 3394-3400
- Stadelhofer, W. / Kaiser, H.-P. / Wedig, M. J. (2009): Nickel Mining and Production – a Sophisticated Task. *Erzmetall*, Vol. 62, Nr. 2: 100-108
- Strassburg, F. W. (1991): Nickel Alloys; in Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry, Vol. A 17, 5th, completely revised edition; Weinheim, Basel, Cambridge, New York, 221-234
- ThyssenKrupp Metallurgie (2008): Produktbezeichnung: Nickel. Sicherheitsdatenblatt gem. 91/155 EWG, Fassung Nr. 2 (Ausdruck vom 02.12.2008); Essen

UNEP [United Nations Environment Programme] (1991): Environmental Aspects of Selected Non-Ferrous Metals Ore Mining: A Technical Guide. Technical Report Series 5. Industry and Environment Programme Activity Centre, UNEP

Wäger, P. / Lang, D. / Bleischwitz, R. / Hagelüken, C. / Meissner, S. / Reller, A. / Wittmer, D. (2010): Seltene Metalle – Rohstoffe für Zukunftstechnologien. SATW Schrift Nr. 41. Schweizerische Akademie der Technischen Wissenschaften; Zürich; <http://www.satw.ch/publikationen/schriften/SelteneMetalle.pdf>

Wikipedia (2010): Edelstahl; <http://de.wikipedia.org/wiki/Edelstahl> (21.02.2010)

Wuppertal Institut (2003): Materialintensitäten von Materialien und Energieträgern im Überblick (MIT-Wertetabelle), Version 2 vom 28.10.2003;
http://www.wupperinst.org/info/entwd/index.html?beitrag_id=437&bid=169

VI. Palladium

Martin Erren und Dominic Wittmer,
Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie

VI.1. Einleitung

VI.1.1. Relevanz

Palladium ist aufgrund seiner aufwendigen Gewinnung und Aufbereitung von hoher Relevanz. Palladium zählt zu den Platingruppenmetallen, die im Allgemeinen einen großen ökologischen Rucksack aufweisen. Bei der Gewinnung der Ausgangserze fallen große Mengen Abraum an und bei der Aufbereitung werden potentiell große Mengen Schwefeldioxid freigesetzt.

Ein Großteil des Palladiums wird – wie auch Platin – in der Produktion von Autokatalysatoren eingesetzt. Das Recycling der Wertstoffe in diesem Einsatzbereich ist problematisch, da viele Altfahrzeuge in Regionen exportiert werden, in denen das Recyclingniveau unklar ist und somit potentiell der Verlust großer Anteile des Palladiums zu erwarten ist. Gleiches gilt auch für in diesen Regionen zugelassene Neufahrzeuge. Dieses Problem tritt ähnlich im Anwendungsbereich Elektronik- und Elektrotechnikindustrie auf. Auch hier kommt es aufgrund des Exports von Schrotten von Elektro- und Elektronikaltgeräten (EAG) potentiell zu Verlusten großer Anteile des Palladiums. Für die Rückgewinnung ist es daher problematisch, dass palladiumhaltige Produkte nicht in die geeigneten Entsorgungswege gelangen und somit nicht recycelt werden (auch in entwickelten Ländern).

VI.1.2. Charakteristika

Allgemeines

Palladium ist ein silbrig-weißes, stark reflektierendes Metall. Es zählt zu den Edelmetallen, wobei es etwas reaktiver ist als Platin. Palladium ist das zweite Element in der

Nickelgruppe und wird zu den sogenannten Platingruppenmetallen gezählt. Es ist löslich in Salpetersäure, bei Luftzutritt ebenfalls in Salzsäure; an der Luft ist es allerdings sehr beständig (Renner et al. 2005).

Der TMR (Globaler Materialaufwand, engl.: *Total Material Requirement*) von Palladium wird mit 100.000 t/t Palladium angegeben (Bringezu / Saurat 2008)¹. Der kumulierte Rohstoffaufwand wird zu ca. 22.400 t/t Palladium (Russland) bzw. ca. 51.000 t/t Palladium (Südafrika) angegeben (ProBas 2010).

Technische Eigenschaften

Platingruppenmetalle zeichnen sich durch einen hohen Schmelzpunkt, eine geringe Elektronenaffinität, ein hohes Normalpotential, eine hohe Korrosionsbeständigkeit und eine hohe Dichte aus. Palladium hat herausragende katalytische Eigenschaften und einen ausgesprochen hohen spezifischen elektrischen Widerstand (Renner et al. 2005).

Toxizität

In metallischer Form ist Palladium nicht brennbar und – abgesehen von Platinstäuben – nicht toxisch. Hingegen ist für Palladiumdichlorid bei intravenöser Verabreichung in Tierversuchen eine letale Dosis von 11 mg/kg Körpergewicht bestimmt worden². Studien zur Zytotoxizität von Palladium-Chlorokomplexen bestimmen eine Effektive Dosis₅₀ (ED₅₀-Wert) von 0,6 mmol/l (Boch 2002). Dieser Wert liegt zwischen den Werten für Chlorokomplexe mit Platin und Rhodium. In der GESTIS-Stoffdatenbank wird die Letale Dosis(LD)₅₀ (oral Ratte) mit 2.700 mg/kg angegeben (IFA 2009). Eine Mutagenität des Palladiumkomplexes konnte jedoch nicht festgestellt werden (Boch 2002). Derzeit sind Palladium und seine Verbindungen von der „Senatskommission zur Prüfung gesundheitsschädlicher Arbeitsstoffe“ (Senat der Deutschen Forschungsgemeinschaft) als Stoffe eingestuft, für die aufgrund fehlender Erfahrungen keine maximale Arbeitsplatzkonzentration (MAK) aufgestellt werden können (Angerer et al. 2009).

¹ Die Angaben dieser Publikation sind spezifisch für Palladium und unterscheiden sich somit von jenen Angaben, die sich allgemein auf Platingruppenmetalle beziehen. Der Berechnung des TMR sowie von Emissionen liegt hier eine monetäre Allokation zugrunde.

² Analog wurde die letale Dosis bei intraperitonealer Applikation (Gabe eines Stoffes in die Bauchhöhle) zu 62 mg/kg Körpergewicht bestimmt.

VI.1.3. Anwendungsbereiche

Der mit Abstand bedeutendste Einsatz des Palladiums liegt im Anwendungsbereich Autokatalysatoren, in dem ca. zwei Drittel der Gesamtnachfrage liegen (Tab. VI-1). Weitere bedeutende Anwendungsbereiche liegen in der Dentalmedizin (global wesentlich bedeutender als in Europa), in der Elektronik/Elektrotechnik und im Bereich Schmuck.

Tab. VI-1: Einsatz von Palladium im Jahr 2008, absolut und relativ, nach Regionen Welt und Europa

Anwendungsbereich	Welt		Europa	
	Absolut [t]	Relativer Anteil [%]	Absolut [t]	Relativer Anteil [%]
Autokatalysatoren:	142.3	63.64	34.7	70.39
Chemische Industrie: Industriekatalysatoren	13.3	5.95	3.3	6.69
Dentalmedizin	19.6	8.77	2.0	4.06
Elektronik und Elektrotechnik	40.1	17.93	5.0	10.14
Schmuck	14.6	6.53	13.4	27.18
Investitionen ³	24.3	10.87	1.6	3.25
Sonstige	2.9	1.30	0.6	1.22
Total	223.6		49.3	

Quelle: nach Johnson Matthey (2010)

Somit umfassen die drei Anwendungsbereiche Autokatalysatoren, Elektronik/Elektrotechnik und Schmuckindustrie zusammen ca. 90 % des weltweiten Einsatzes.

Palladium wird aufgrund seiner guten katalytischen Eigenschaften auch in Industriekatalysatoren eingesetzt. Weiterhin ist es im Finanzsektor gefragt: so wird Palladium als Geldanlage physisch in Form von Münzen und Barren deponiert, um es zu einem späteren Zeitpunkt gewinnbringend auf dem Weltmarkt zu veräußern.

Seit 1999 ist weltweit ein leicht rückläufiger Trend bei der Palladiumnachfrage zu verzeichnen, insbesondere im Bereich der Dentalmedizin und der Elektronikbranche.

³ Investment: Palladiummünzen und -barren

Autokatalysatoren

Platingruppenmetalle werden seit den 1970er Jahren zur Reinigung von Abgasen von Verbrennungsmotoren eingesetzt. Eine wichtige Anwendung sind Kraftfahrzeuge, traditionell Fahrzeuge mit Benzinmotor. Katalytische Eigenschaften weisen auch Platin und Rhodium auf, so dass diese Palladium substituieren oder in Kombination mit Palladium eingesetzt werden können. Für den Einsatz in Dieselfahrzeugen wurde lange Zeit ausschließlich Platin eingesetzt (Saurat / Bringezu 2008), da es stabil gegenüber Schwefel und einer Oxidation ist. Mit der Einführung schwefelarmer Dieselmotoren und der Verbesserung des Motormanagements der Fahrzeuge ist hier eine Änderung eingetreten (Saurat / Bringezu 2008): Umicore (2006) meldet seit 2006 den Einsatz von Palladium in Katalysatoren von Dieselfahrzeugen. Infolgedessen wurden ca. 25 % des Platins beim Einsatz in Dieselmotoren durch Palladium ersetzt (Umicore 2006). Da Platin auch derzeit teurer ist als Palladium ergänzt Palladium, sofern technisch möglich, die Zusammensetzung von Autokatalysatoren.

Aufgrund der Fortschritte in der Forschung und Entwicklung sind neben einer Verbesserung der Materialeffizienz auch zusätzliche materielle Substitutionsmöglichkeiten zu erwarten. Aktuell wird eine Substitution bzw. Ergänzung durch Gold entwickelt⁴. Die Materialwahl im Bereich Autokatalysatoren wird auch in Zukunft wesentlich durch die Preisentwicklung von Palladium und seinen potentiellen Substituten beeinflusst.

Elektronik und Elektrotechnik

Platingruppenmetalle werden in der Elektro- und Elektronikindustrie in einer Vielzahl von Anwendungen eingesetzt. Aufgrund der technischen Eigenschaften von Palladium und der fortschreitenden Entwicklung sind hier viele Anwendungsmöglichkeiten entstanden. Wichtige Anwendungsbereiche sind folgende:

- Kontaktwerkstoffe (Schalter, Relais und Steckkontakte),
- Sensorik (Lambda-Sonde) und
- Elektronik (Lote, Keramikvielschicht-Chipkondensatoren (MLCC)).

⁴ Der Hersteller Nanostellar entwickelt zum Beispiel Autokatalysatoren mit Pt-Pd-Au-Gemisch (Nanostellar 2010).

Seit 1999 ist in der Elektronik und Elektrotechnik in leicht rückläufiger Trend für die Nutzung von Palladium zu verzeichnen. Ursache sind die zunehmende Miniaturisierung und die Substitution durch Nickel in MLCC (Angerer et al. 2009).

Industriekatalysatoren

Platingruppenmetalle im Allgemeinen werden bevorzugt für Katalysatoren in diversen industriellen Prozessen verwendet, wobei sich die Anwendungen der Industriekatalysatoren nach ihrem Einsatz und ihrer Funktion unterscheiden lassen. Palladium wird in folgenden Anwendungen mit Schwerpunkt auf den Pulverkatalysatoren⁵ und den Festwirbelbettkatalysatoren eingesetzt (Hagelüken et al. 2005a).

- Raffineriekatalysatoren,
- Salpetersäureproduktion,
- Chemiekatalysatoren
 - Einsatz zur homogenen Katalyse,
 - Pulverkatalysatoren,
 - Fest- und Wirbelbettkatalysatoren,
- Umweltkatalysatoren (ohne Autoabgaskatalysatoren).

Dentalmedizin

Beim Einsatz von Materialien in der Zahnheilkunde müssen bestimmte Voraussetzungen bzgl. der Biokompatibilität, der Korrosionsbeständigkeit und der mechanischen Belastbarkeit erfüllt sein. Palladium erfüllt diese Eigenschaften ausreichend. Im Gegensatz zu Titan wird Palladium jedoch nicht als reines Metall eingesetzt, sondern in Form von Edelmetalllegierungen (Hagelüken et al. 2005).

⁵ Edelmetallhaltige Pulverkatalysatoren werden z.B. zur Herstellung von Vitaminen, Duft- und Farbstoffen, Antibiotika usw. verwendet. Reaktionstypen, die hierbei auftreten, sind u.a. selektive Hydrierung und Oxidationsreaktionen.

Schmuckindustrie

Palladium wird in der Schmuckindustrie im Wesentlichen als Legierungsmetall eingesetzt. In Platin-Schmucklegierungen wird Palladium neben anderen Metallen wie z.B. Kupfer, Kobalt, Wolfram, Iridium und Ruthenium verarbeitet. Das Legieren verleiht dem Platin die technischen Eigenschaften, die zur Weiterverarbeitung als Schmuck notwendig sind. Daneben wird Palladium auch zur Herstellung von Weißgold eingesetzt. Zum Entfärben des Goldes können Nickel und Palladium verwendet werden. Da Nickel jedoch oftmals Hautirritationen hervorruft, wird heute auf Nickel zugunsten von Palladium weitestgehend verzichtet (Hagelüken et al. 2005).

VI.2. Umweltbelastungen und Materialverluste

VI.2.1. Abbau

Erze der Platingruppenmetalle werden im Allgemeinen im Untertagebau gefördert. Vorkommen der Platingruppenmetalle lassen sich in zwei Gruppen einteilen: Zum einen in Platinmetall-Lagerstätten, die gezielt wegen ihres relativ hohen Platinmetallgehaltes abgebaut werden. Dieser Lagerstättentyp ist beispielsweise in Südafrika zu finden. Zum anderen in anderen Metallagerstätten, z.B. Buntmetallagerstätten (Kupfer und Nickel), wie man sie in Sibirien und Kanada findet. Platingruppenmetalle fallen hier als Kuppelprodukte an. Im Jahr 2008 wurden insgesamt 230 t Palladium gewonnen.

Zur Erschließung von neuen Abbaugebieten sind Sprengungen erforderlich, die auch Auswirkungen auf die Umwelt haben. Nach der Förderung wird das Erz grob zerkleinert und vom Abbaugebiet zu den Aufbereitungsanlagen transportiert. Taubes Gestein wird später zum Auffüllen der entstandenen Tunnelanlagen verwendet oder unmittelbar neben dem Abbaugebiet deponiert.

Beim Abbau von Platingruppenmetallen entstehen erhebliche Umweltauswirkungen durch ungenutzte Extraktion. Der TMR von Primärpalladium liegt bei durchschnittlich ca. 100.000 t/t Palladium, ein Großteil davon durch die ungenutzte Extraktion bedingt (Saurat / Bringezu 2008). Entsprechend diesen Angaben wurden im Jahr 2008 infolge der Gewinnung von Palladium ca. 23 Mio. Tonnen Primärmaterial extrahiert.

Tab. VI-2: Umweltbelastung und jährliche Materialverluste beim Abbau von Palladium

Erztyp, spezifiziert durch Hauptminerale	Umweltbelastung	Materialverluste	Bemerkungen
	Flächeninanspruchnahme durch Abbau bewirkt tiefgreifenden Eingriff in die Landschaft	nicht bekannt	

VI.2.2. Aufbereitung

Das Erz wird in einem ersten Schritt vorsortiert, anschließend zerkleinert und mittels Flotation fraktioniert. Während dieser Schritte kommt es in der Regel zu Staubemissionen. Einerseits ist das Feinstaubaufkommen selbst eine Umweltbelastung. Inwiefern die Stäube zu Palladiumverlusten führen, konnte mit der vorliegenden Literatur nicht geklärt werden.

Ferner kommt es während der Flotation zum Verlust von Flotationshilfsstoffen. Einige dieser Hilfsstoffe sind flüchtige organische Verbindungen (VOC), die direkt verdunsten, andere haften während des Flotationsprozesses an den Partikeln. Hilfsstoffe, die während dieses Prozesses eingesetzt werden, lassen sich in folgende Gruppen einteilen:

- Schäumer,
- Sammler,
- Regler und
- Drücker.

Als Schäumer werden Methyl, Isobutyl und Carbinol eingesetzt, als Sammler Xanthat⁶ und Aerofloat⁷. Die Mengen der eingesetzten Schäumer- und Sammler-Hilfsstoffe konnten anhand der vorliegenden Fachliteratur nicht ermittelt werden⁸.

Da Palladium in sulfidischen Erzen gebunden ist, entstehen bei der Aufbereitung erhebliche Mengen Schwefeldioxid. Je nach eingesetzter Technik, insbesondere jener zur Abgasreinigung, kann es zur Freisetzung des Schwefeldioxids und damit zu erheblichen Umweltbelastungen kommen. Je Tonne Palladium fallen bei der Aufbereitung von Erzen 1.545 kg Schwefeldioxid-Äquivalente (SO₂äq) an (Saurat / Bringezu 2008)¹, was bezogen auf die Weltproduktion Palladium im Jahr 2008 einer Menge von ca. 360.000 t (SO₂äq) entspricht. Die Freisetzung von Schwefeldioxid ist insbesondere bei der Aufbereitung in Russland von großer Bedeutung. Bezogen auf die im Jahr 2004 nach Europa importierte Menge Platingruppenmetalle (größtenteils Palladium für die Katalysatorenherstellung) wurden 156.000 t (SO₂äq) in die Umwelt emittiert. Diese Emissionen führen in einem Umkreis von mehreren hundert Kilometern um die Aufbereitungsstätten zu Umweltbelastungen durch sauren Regen und können zu gesundheitlichen Beeinträchtigungen führen (Saurat / Bringezu 2008). Der russische Konzern Norilsk Nickel führt aktuell technische Veränderungen durch, die bis einschließlich 2012 Schwefelemissionen in erheblichem Ausmaß unterbinden sollen (Norilsk Nickel 2009).

⁶ Xanthanes sind eine Gruppe von organischen Salzen, die durch die Behandlung von Carbondisulfid mit Alkohol unter Anwesenheit von alkalischem Kaliummethylxanthogenat entstehen (KC₃H₅S₂O, CAS No: 140-89-6).

⁷ Aerofloat ist ein Salz der Carbonyldithiophosphoric-Säure.

⁸ Im Kupferbergbau werden 25-300 g Sammler und 25-250 g Schäumer je Tonne verarbeitetes Erz veranschlagt (Classen et al. 2009).

Tab. VI-3: Umweltbelastung und jährliche Materialverluste bei der Aufbereitung von Palladium

Rohstoff	Umweltbelastung	Materialverluste	Bemerkungen
Palladiumerz (im Allg. Platingruppenmetallerz, auch Nickel- und Kupfererze)	SO ₂ -Äq.: ca. 1.500 t/t Pd	nicht bekannt	SO ₂ -Emissionen sind in Russland durch technische Verbesserungen verringert worden und weitere sind angekündigt (Norilsk Nickel 2009)

VI.2.3. Verarbeitung

Palladium wird unter anderem zur Herstellung diverser Legierungen verwendet. In der Fachliteratur konnten keine Angaben gefunden werden, dass die Herstellung von Legierungen zu Umweltbelastungen und/oder Verlusten an Palladium führen.

Tab. VI-4: Umweltbelastung und jährliche Materialverluste bei der Verarbeitung von Palladium

Halbzeug	Umweltbelastung	Materialverluste	Bemerkungen
diverse Legierungen	nicht bekannt	nicht bekannt	

VI.2.4. Produktion palladiumhaltiger Produkte

Palladium wird in metallischer Form zu vielen Produkten verarbeitet. Eine Verwendung in Form von chemischen Verbindungen findet dagegen nicht statt. Ob bei der Produktion von palladiumhaltigen Produkten Verluste an Palladium auftreten, ist in der vorliegenden Fachliteratur nicht dokumentiert. Aufgrund des hohen Palladiumpreises und der fehlenden Angaben zu Palladiumverlusten während der Produktion ist davon auszugehen, dass die Palladiumverluste technisch minimiert sind und nicht in relevanter Menge auftreten.

Umweltbelastungen sind nicht dokumentiert.

VI.2.5. Nutzung⁹

Palladium wird in einer Vielzahl von Produkten eingesetzt. Je nach Einsatz des Palladiums kommt es während der Nutzung zu Umweltbelastungen und Materialverlusten. Relevant sind hier insbesondere die Anwendungsbereiche „Autokatalysatoren“ und „Elektro- und Elektronikindustrie“. In den folgenden Absätzen werden diese sowie weitere Anwendungsbereiche hinsichtlich ihrer Umweltbelastungen und Materialverlusten dargestellt.

Autokatalysatoren

Die Verwendung von Autokatalysatoren führt zu einem geringen Mehrverbrauch von Kraftstoff. Im Wesentlichen verhindern sie aber am Einsatzort Luftemissionen durch Verbrennungsmotoren. Grundsätzlich werden eingesparte Umweltbelastungen am Einsatzort zumindest teilweise durch Umweltbelastungen am Ort der Primärproduktion der Platingruppenmetalle „erkauft“, was zu einer Problemverlagerung zu Lasten der Produzentenregionen führt (Umweltbelastungen: siehe Kap. VI.2.2). Saurat und Bringezu (2008) ermittelten für Benzinfahrzeuge (Bezugsjahr: Produktion 2001) zur Amortisation (Aufwendungen und Einsparungen von Kohlendioxid (CO₂) und Schwefeldioxid (SO₂)) eine Mindestlaufleistung von 4.616 km. Bei Dieselfahrzeugen beträgt die entsprechende Mindestlaufleistung ca. 95.000 km. Eine Ermittlung der Netto-Einspareffekte erfordert demnach eine globale Betrachtung.

Während der Nutzungsphase von Fahrzeugkatalysatoren treten technisch bedingte Verluste von Platin-gruppenmetallen (PGM) auf, die jedoch relativ gering sind¹⁰. Diese Verluste hängen unter anderem von der Nutzungsdauer und den Fahrbedingungen ab. In der Fachliteratur werden die Verluste für Deutschland deutlich unter 5 % angegeben, was bedeutet, dass im Laufe einer durchschnittlichen Nutzungsphase in Deutschland weniger als 5 % des Palladiums aus den Katalysatoren freigesetzt wird und in die Umwelt gelangt (Hagelüken et al. 2005). Das Durchschnittsalter der in Deutschland zugelassenen Personenkraftwagen (Pkw) beträgt 8,1 Jahre (KBA 2010). Hieraus resultiert ein jährlicher relativer Verlust in Deutschland von $\leq 0,62$ % Palladium. Unter Umständen kann dieser Verlust jedoch wesentlich höher ausfallen. Untersuchungen im

⁹ Im Arbeitsschritt AS 2.2 des MaRes-Projekts wurde die Nutzungsphase der Platingruppenmetalle ausführlich untersucht. Dieses Unterkapitel fasst die für diese Untersuchung relevanten Informationen zusammen.

¹⁰ Da die Verluste zumindest teilweise auf physische Beanspruchung des Katalysators zurückzuführen sind, korreliert der spezifische Verlust (pro Kilometer) mit der durchschnittlichen Minderqualität der Straßen: Geringe streckenspezifische Verluste in Europa sind daher nicht auf jene Länder übertragbar, die mangelhafte Straßenverhältnisse aufweisen.

Senegal haben gezeigt, dass etwa die Hälfte der analysierten Autokatalysatoren leer bzw. fast leer waren, d. b. ohne Palladium (Hagelüken et al. 2005). Daraus folgt, dass es Einflüsse gibt, die den Materialverlust während der Nutzungsphase negativ beeinflussen können. Für eine konservative Abschätzung wird ein jährlicher Materialverlust von 0,62 % auch für die Welt angenommen. Hieraus ergibt sich für das Jahr 2008 ein Palladiumverlust von ca. 890 kg.

Es ist unsicher, welcher Anteil der exportierten Fahrzeuge nach der Nutzungsphase recycelt wird – und zu welchem Grad: es ist plausibel, dass ein großer Anteil der Fahrzeuge zumindest ein Stahlrecycling erfahren. Es wird hier davon ausgegangen, dass mit Ausnahme der von Deutschland übertragenen Verluste (890 kg Palladium) das in Autokatalysatoren befindliche Palladium auf irgendeine Weise verwertet wird und daher nicht als Verlust der Nutzungsphase angesehen wird.

Elektro- und Elektronikindustrie

Der Materialverlust von Palladium aus Elektroaltgeräten ist hoch. Dies liegt sowohl an der sehr geringen Sammelquote der Altgeräte, die Palladium und andere Edelmetalle enthalten, als auch an der Behandlung, die oftmals nicht auf die Rückgewinnung dieser Metalle ausgerichtet ist. Tab. VI-8 zeigt Sammelquoten für die EU-27 für verschiedene Produktkategorien; aufgrund des Palladiumsgehaltes sind hier insbesondere die Gerätegruppen 3A und 4A von Interesse. Eine Übersicht über den Palladiumgehalt verschiedener Gerätekategorien liefert Tab. VI-1. Gründe für die relativ niedrigen Sammelquoten sind v.a. die Entsorgung der Kleingeräte über den Hausmüll.

Weiterhin wird ein Teil der Altgeräte illegal als Gebrauchtgeräte in nicht EU-Länder exportiert und in den Empfängerstaaten oftmals unsachgemäß entsorgt.

Tab. VI-5: Sammelquote der WEEE-Kategorien EU-27 im Jahr 2005 (Originalbezeichnungen auf Englisch)

#	Treatment category	Current % collected of WEEE arising
1A	Large household Appliances	16,3%
1B	Cooling and freezing	27,3%
1C	Large household Appliances (small items)	40,0%
2,5A,8	Small household appliances, lighting equipment. – Luminaires and 'domestic' medical devices	26,6%
3A	IT and telecom excl. CRT	27,8%
3B	CRT monitors	35,3%
3C	LCD monitors	40,5%
4A	Consumer Electronic excl. CRT	40,1%
4B	CRT TV	29,9%
4C	Flat panel TV	40,5%
5B	Lighting equipment – lamps	27,9%
6	Electrical and electronic tools	20,8%
7	Toys, leisure and sports equipment	24,3%
8	Medical devices	49,7%
9	Monitoring and control instruments	65,2%
10	Automatic dispensers	59,4%

Quelle: Huisman et al. (2007)

Eine Regelung dieser Transporte ist Gegenstand der Elektro- und Elektronikaltgeräte (EAG) Abfall-Direktive. Trotz der Regelung des WEEE-Exportes¹¹ durch die Basler Konvention¹² (Verbot seit 2005) werden weiterhin große Mengen EAG exportiert. Erschwerend beim Vollzug sind der hohe Aufwand der Containersichtungen und die schwierige Abgrenzung zwischen Gebraucht- und Altgeräten.

In der EU-27 werden 25-40 % der Platinmetallfrachten in Elektro- und Elektronikprodukten eingesammelt und dem Recycling zugeführt (Huisman et al. 2007). Hier entstehen weitere Verluste die darauf zurück zu führen sind, dass die Behandlungsverfahren nicht auf Edel- und Sondermetalle abgestimmt sind. Entsprechend werden in der EU-27 ca. 60-75 % der in EAG enthaltenen Platingruppenmetalle nicht rezykliert und sind zumindest teilweise¹³ verlustig (Huisman et al. 2007, Saurat / Bringezu 2008).

¹¹ Directive 2002/96/EC on waste electrical and electronic equipment

¹² Basler Übereinkommen über die Kontrolle der grenzüberschreitenden Verbringung gefährlicher Abfälle und ihrer Entsorgung

¹³ Zwar wird auch in den Regionen außerhalb Europas, in die EAG exportiert werden, ein Recycling durchgeführt, doch beschränkt sich dies häufig auf die relativ leicht gewinnbaren Metalle wie Kupfer

Diese Geräte gelangen sowohl in den Export als auch in den Hausmüll und werden somit nicht dem Recyclingkreislauf zur Verfügung gestellt.

Für das Jahr 2007 und für die Regionen Deutschland und den Vereinigten Staaten sind Gesamtverluste von 73 % Palladium für Deutschland und 75 % Palladium für die Vereinigten Staaten dokumentiert (Chancerel 2009). Diese hohen Verlustraten treten auf, obwohl zumindest die Sammelquote in Deutschland mit 77 % (Vereinigte Staaten: 30 %) recht hoch ist. Für Deutschland lässt sich folgern, dass die Recyclingstrukturen begründen, dass eine Rückgewinnung nur sehr begrenzt erfolgt. Dies entspricht für Deutschland im Jahr 2007 einem Palladiumverlust von ca. 0,5 t, für die Vereinigten Staaten von ca. 1,5 t.

Durch Übertragen der hier veranschlagten Verlustrate von ca. 75 % (Deutschland: 73 % und Vereinigte Staaten 75 %) erhält man eine grobe Abschätzung für den globalen Palladium-Haushalt. Man erhält für das Jahr 2007 einen Verlust von ca. 30 t Palladium, die innerhalb der Nutzungs- oder Recyclingsphase anfallen. Hiervon können ca. 9-23 t nach der Nutzungsphase und 7-21 t während des Recyclings entstehen. Dies hängt maßgeblich davon ab, inwiefern die EAG tatsächlich den Recyclingstrukturen zugeführt werden.

Entscheidend hierbei ist die Zuordnung der Verluste: Nach Chancerel (2009) werden in Deutschland – bezogen auf EAG – ca. 77 % der palladiumführenden Produkte gesammelt, somit gehen ca. 23 % des Palladiums während der Nutzungsphase verloren. Vergleichsweise dazu ist die Sammelquote in den Vereinigten Staaten gering: Sie liegt bei ca. 30 % und somit ergibt sich eine Verlustrate nach der Nutzungsphase von ca. 70 % des dort eingesetzten Palladiums. Die von Chancerel (2009) angegebenen Sammelquoten beziehen sich auf kleine EAG.

Wie im Detail die Sammelquoten weitere Länder einzuschätzen sind, ist ungewiss. Es ist jedoch davon auszugehen, dass die in Deutschland erzielten Sammelquoten für viele Länder nicht zu erzielen sind und somit ein Großteil der Verluste in der Welt bereits in der Nutzungsphase auftreten. Es wird festgestellt, dass die Sammlung der EAG nicht zwangsläufig zu einem guten Ergebnis führen muss. Deutschland ist hierfür ein Beispiel und es zeigt, dass auch innerhalb der Recyclingstrukturen selbst weitere Potentiale genutzt werden müssen.

und Gold; eine Rückgewinnung von Platingruppenmetallen wird hier als vernachlässigbar eingeschätzt.

Tab. VI-7 gibt einen Überblick über die Leistung der Rezykliersysteme Deutschlands und der Vereinigten Staaten.

Tab. VI-6: Übersicht der Gold- und Palladiumverluste der EAG-Recyclingsysteme Deutschlands und der Vereinigten Staaten (USA) für das Jahr 2007. Positionsbezeichnungen teils Englisch (kursiv)

Land	Geräte- kategorie	Sammel- rate	Wieder- verwen- dungs- rate	Treatment rate		Recovery rate		Discarding rate	
				Formal	Informal	Au	Pd	Au	Pd
Deutsch- land	<i>Mobile telephone</i>	18%	5%	12%	1%	7%	7%	88%	88%
	<i>Desktop PC</i>	76%	7%	62%	7%	37%	36%	56%	57%
	<i>CRT Monitor</i>	99%	3%	76%	20%	47%	44%	51%	53%
	<i>Large high- grade eq.</i>	92%	4%	81%	7%	33%	32%	64%	65%
	<i>Small high- grade eq.</i>	54%	1%	49%	3%	20%	19%	79%	80%
	<i>Low grade eq.</i>	60%	3%	52%	5%	15%	15%	82%	83%
	<i>All groups</i>	77%	3%	64%	10%	24%	23%	72%	73%
USA	<i>Mobile telephone</i>	11%	4%	5%	1%	4%	4%	92%	92%
	<i>Desktop PC</i>	54%	15%	30%	7%	24%	23%	61%	62%
	<i>CRT Monitor</i>	40%	6%	14%	20%	11%	8%	83%	86%
	<i>Large high- grade eq.</i>	59%	17%	32%	8%	17%	16%	66%	67%
	<i>Small high- grade eq.</i>	22%	0%	17%	4%	9%	8%	91%	91%
	<i>Low grade eq.</i>	1%	0%	0%	0%	0%	0%	100 %	100 %
	<i>All groups</i>	30%	6%	13%	10%	15%	14%	75%	75%

Quelle: Chancerel (2009)

Industriekatalysatoren

In Deutschland werden jährlich ca. 8,4 t Platingruppenmetalle in der Produktion von Industriekatalysatoren eingesetzt; globale Mengenangaben sind nicht verfügbar. Ungefähr die Hälfte der in Deutschland eingesetzten Platingruppenmetalle ist Palladium, davon entfallen 3,1 t auf Pulverkatalysatoren und 720 kg auf Fest- bzw. Wirbelbettkatalysatoren. Ob während der Nutzungsphase Materialverluste auftreten, ist nicht bekannt; Umweltbelastungen sind keine bekannt.

Schmuck

Die Nachfrage nach Schmuck hat sich in den vergangenen Jahren ausgesprochen dynamisch entwickelt (Tab. VI-7). Global ist ein starker Rückgang der Nachfrage zu verzeichnen, in Europa hingegen ein starker Anstieg, vor allem in den Jahren 2007 und 2008. Ursache für die Nachfrageschwankungen sind neben Preisschwankungen in erster Linie Modetrends, denen die Schmucknachfrage folgt.

Tab. VI-7 Entwicklung der weltweiten Palladiumnachfrage im Anwendungsbereich Schmuck im Zeitraum 1999-2008 aufgeteilt nach Weltregionen. Angaben in Tonnen,

Jahr	Europa	Japan	Nordamerika	China	Rest der Welt	Welt
1999	1,56	3,27	0,31	1,20	0,90	7,31
2000	1,40	4,67	0,31	0,60	1,00	7,93
2001	1,09	4,35	0,31	0,80	0,90	7,46
2002	1,09	5,13	0,31	0,90	1,00	8,40
2003	1,09	4,98	0,31	0,80	0,90	8,09
2004	1,09	4,82	0,31	21,80	0,90	28,93
2005	1,09	4,51	0,62	37,40	0,90	44,48
2006	1,20	4,00	1,20	23,70	0,80	30,90
2007	8,70	0,00	-0,60	0,00	0,00	8,10
2008	13,40	0,00	1,20	0,00	0,00	14,60

Quelle: Johnson Matthey (2010)

Wie die Nachfrage hängt auch die Lebensdauer der Produkte im Anwendungsbereich Schmuck teilweise von sozio-kulturellen Parametern ab. Die durchschnittliche „Lebensdauer“ von palladiumhaltigem Schmuck ist nicht bekannt, doch es ist davon auszugehen, dass die Lebensdauer durch Veräußerung (teils über Rückgabe an den Schmuckhandel) bzw. Vererbung sukzessive verlängert wird. Der Schmuckhandel erfüllt zwei Funktionen: Teils wird der „Altschmuck“ zur Weiterverwendung bei neuen Endnutzern bereitgestellt, teils wird er dem Recyclingkreislauf zugeführt.

Es ist festzuhalten, dass Datenlücken zu den Mengen an palladiumhaltigem Schmuck und ihrem Verbleib bestehen. Es ist davon auszugehen, dass ein Großteil des Schmuckes in langjährigem Besitz verbleibt bzw. dem Recycling zugeführt wird. Materialverluste werden an dieser Stelle als vernachlässigbar eingeschätzt. Umweltbelastungen treten während der Nutzung nicht auf.

Dentalmedizin

Weltweit wurden im Jahr 2008 ca. 20 t Palladium in der Dentalmedizin verwendet. In Europa sind es ca. 2 t, wobei nach Einschätzung von Experten ca. 70 % dieser Menge (ca. 1,5 t Palladium) auf Deutschland entfallen (Hagelüken et al. 2005). Im Anwendungsbereich Dentalmedizin wird Palladium in Form von Implantaten und Prothesen eingesetzt. Im Zusammenhang mit der Nutzung kommt es zu signifikanten Verlusten:

Von vielen Patienten wird der Materialwert ihres Zahnersatzes für verhältnismäßig gering eingeschätzt. Es ist unklar, inwieweit die Patienten ihre freigewordenen Implantate aufheben oder diese mangels Wertschätzung über den Hausmüll entsorgen. Erhebungen zu diesem Sachverhalt sind keine verfügbar, doch Experten schätzen diese Verluste auf durchschnittlich 50 % (Hagelüken et al. 2005). Im Sterbefall verbleiben die implantierten Dentallegierungen (und damit das darin enthaltene Palladium) teilweise in den Kiefern der Verstorbenen, d. b. sie werden nicht zurückgewonnen¹⁴

Sicher wird den Patienten in vielen Zahnarztpraxen die Möglichkeit geboten, obsolete Füllungen und Prothesen an Ort und Stelle dem Recyclingkreislauf zuzuführen. Hierfür gibt es Umschläge und Formulare, die an die entsprechenden Sammel- bzw. Recyclingstellen zu senden sind. Einzig der Punkt, dass viele Patienten den Wert aufgrund der oftmals geringen Mengen nicht richtig einschätzen, ist hierbei nicht gelöst. Eine verbesserte Kommunikation zwischen den Zahnärzten und seinen Patienten würde hier eine Verbesserung bewirken.

Bezogen auf die in den Jahren 1999-2008 durchschnittlich eingesetzte Menge Palladium und der oben genannten Verlustrate ist weltweit von einem jährlichen Verlust von ca. 12 t Palladium auszugehen, für Europa von ca. 1,3 t Palladium und für Deutschland von ca. 0,91 t Palladium.

¹⁴ Es handelt sich um ein kulturelles Phänomen, das nicht technisch begründet ist.

Tab. VI-8: Umweltbelastung und jährliche Materialverluste bei der Nutzung von Palladium

Anwendungsbereich	Produkt	Umweltbelastung	Materialverluste	Bemerkungen
Autokatalysator	Fahrzeuge	geringer Kraftstoffmehrverbrauch bei Fahrzeugen mit einem Autokatalysator	ca. 0,88 t	:
Elektro- und Elektronikindustrie	diverse	nicht bekannt	9-23 t	
Schmuck		nicht bekannt	nicht bekannt	
Dentalmedizin	Implantate und Prothesen	nicht bekannt	12 t	

VI.2.6. Recycling

Im Folgenden wird das Recycling von Palladium aus Endprodukten sowie aus Zwischenprodukten der Produktion diskutiert. Bei den Endprodukten wird das Recycling für die verschiedenen Anwendungsbereiche getrennt betrachtet. Im Jahr 2008 wurden 50 t Palladium rezykliert und für die Produktion palladiumhaltiger Produkte bereitgestellt (Johnson Matthey 2010). Hiervon stammen ca. 36 t aus Katalysatoren, ca. 11 t aus Elektro- und Elektronikprodukten und ca. 2,2 t aus Altschmuck.

Die Umweltbelastungen der Primär- und der Sekundär-Produktion von Platingruppenmetallen sind in Tab. VI-9 zusammengefasst. Man erkennt, dass das Recycling allgemein ein relevantes Potential zur Senkung der Umweltbelastungen mit sich bringt. Die Primärproduktion von Palladium erfolgt aus niedrig konzentrierten Erzen. Dagegen sind die Palladiumkonzentrationen in Altgeräten sehr viel höher und die Rückgewinnung erfolgt mit einem sehr viel geringeren Energieeinsatz (entsprechend einem geringeren Kohlendioxid-Äquivalent) (Saurat / Bringezu 2008).

Tab. VI-9: Umweltbelastungen der Primär- und Sekundärproduktion von Platingruppenmetallen im Vergleich

Impact indicators	No allocation	After allocation to			
		Pt	Pd	Rh	PGMs
Primary production in t/t PGMs					
CO _{2eq}	41,350.84	39,892.65	7,221.62	46,829.35	23,451.09
SO _{2eq}	7267.15	1942.92	1,545.12	2,308.42	1,792.31
TMR	593,090.23	683,564.91	99,891.12	802,707.88	388,602.19
Secondary production in t/t PGMs					
CO _{2eq}	4,407.40	2,875.36	787.71	3,322.04	1,851.46
SO _{2eq}	39.86	26.01	7.12	30.05	16.75
TMR	13,974.25	8,738.82	2,394.01	10,096.40	5,626.99
Ratio primary:secondary					
CO _{2eq}	9.38	13.87	9.17	14.10	12.67
SO _{2eq}	182.31	74.71	216.88	76.83	107.03
TMR	42.44	78.22	41.73	79.50	69.06

Note: Pt = platinum; Pd = palladium; Rh = rhodium; SO_{2eq} = sulfur dioxide equivalent; CO_{2eq} = carbon dioxide equivalent; TMR = total material requirement.

Quelle: Saurat und Bringezu (2008)

Grundsätzlich hängt die Wahl der geeigneten Recyclingprozesse von verschiedenen Faktoren ab. Wichtig hierbei sind:

- Edelmetallkonzentration,
- Edelmetallzusammensetzung,
- Matriceigenschaften und
- Verunreinigungen durch unedle Metalle und organische Komponenten.

Anders als bei der Primärmaterialproduktion ist bei Sekundärscheidereien eine große Bandbreite an Ausgangsmaterialien zu verarbeiten. Diese Schwierigkeiten führen dazu, dass die hoch komplexen Prozessketten nur von wenigen Sekundärscheidereien durchgeführt werden (Hagelüken et al. 2005). Die wesentlichen Verfahrensschritte dieser Prozesse sind:

- Präparation/Probeentnahme,
- Voranreicherung,
- Aufschluss und Platinmetall-Abtrennung und
- Raffination.

Während dieser Prozesskette kommt es in Abhängigkeit des Ausgangsprodukts zu unterschiedlichen prozessbedingten Materialverlusten, die in den folgenden Unterkapiteln erläutert werden.

Autokatalysatoren

Eine Untersuchung aus dem Jahr 2005 geht für Deutschland davon aus, dass nur ca. 41 % der eingesetzten Platingruppenmetalle nach der Nutzungsphase ins Recycling gelangen und wiedergewonnen werden (Hagelüken et al. 2005a, Hagelüken et al. 2005b). Der relativ große Verlust rührt daher, dass nur sehr wenige Katalysatoren einem Katalysatorrecycling zugeführt werden. Ein großer Anteil der Altfahrzeuge beispielsweise aus Deutschland oder anderen westeuropäischen Ländern wird nach seiner ersten Nutzungsphase in andere Regionen exportiert. Dort werden die gebrauchten Fahrzeuge dann weitergenutzt, z.B. in Osteuropa, Afrika und Asien. Zum Teil schließt sich der zweiten Nutzungsphase sogar eine dritte Nutzungsphase an.

Bei der Nutzung und am Lebensende der Fahrzeuge in osteuropäischen, afrikanischen, asiatischen und anderen Ländern kommt es in der Regel zu größeren Materialverlusten als dies in Westeuropa der Fall ist. Zu den Ursachen für diese erhöhten Materialverluste zählen folgende zwei Aspekte:

- In den Importregionen ist teilweise eine schlechte Straßeninfrastruktur vorzufinden. So führen schlechte Straßenverhältnisse, ungenügende Fachkenntnis der Mechaniker und längere Nutzungsdauer der Katalysatoren zu Verlusten während der Nutzung von deutlich über 5 %. Eine Untersuchung in Senegal im Jahr 2003 hat beispielsweise ergeben, dass 50 % der untersuchten Katalysatoren kein bzw. fast kein Platinmetall mehr aufweisen (nach Hagelüken et al. 2005a).

- Sofern die Katalysatoren in der Einsatzregion dem Recycling zugeführt werden, sind die Werkstätten und Recyclinganlagen¹⁵ technisch auf einem schlechteren Stand, so dass nur geringere Recyclingquoten möglich sind. Die hochspezialisierten Recyclingwerke in Europa weisen dagegen nur sehr geringe Materialverluste während der Rückgewinnung auf.

Obwohl diese Kausalzusammenhänge belegt sind, kann das Ausmaß der Verluste bzw. deren Bedeutung noch nicht abschließend beurteilt werden. Es bestehen weiterhin Kenntnislücken hinsichtlich:

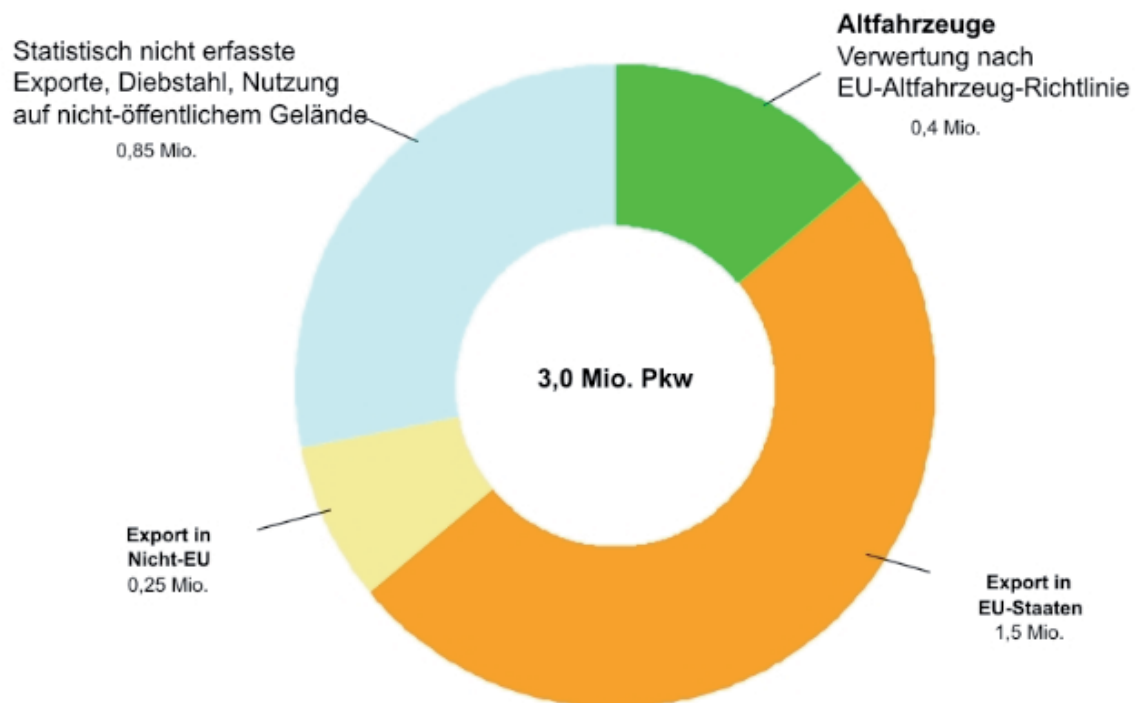
- dem Verbleib der Fahrzeuge: Wie viele Fahrzeuge werden in welchem Fahrzeugalter wohin exportiert? Dies schließt neben den Altfahrzeugen auch die Neufahrzeuge ein.
- der potentiellen Rezyklierpraktiken: Bestehen in den Ländern der finalen Nutzung Sammelsysteme und Anlagen für die Rückgewinnung? Welche Fahrzeuge werden damit erfasst, und welche Platinmetallmenge ist zu diesem Zeitpunkt dann noch in den Katalysatoren vorhanden?

Eine abschließende Einschätzung der beiden Punkte ist bislang noch nicht möglich. Frühere Studien hatten bereits diese Aspekte ausgehend von den aus Deutschland exportierten Gebrauchtfahrzeugen untersucht (Buchert et al. 2007) (vgl. Abb. VI-2). Zurzeit wird die Exportpraxis von Altfahrzeugen hinsichtlich der Exporte aus Deutschland in osteuropäische Länder im Auftrag des Umweltbundesamtes (UBA) genauer untersucht (vgl. Zusammenfassung MaRess AS 2.2).

Das UBA hat den Verbleib der gelöschten Pkw für das Jahr 2008 untersucht und bilanziert (Abb. VI-1).

¹⁵ Recyclinganlagen umfassen: Autoverwerter, Einsammler, Entmantler und Refiner

Abb. VI-1: Verbleib der in Deutschland gelöschten Pkw im Jahr 2008¹⁶



Quelle: UBA (2010)

Insgesamt gelangen ca. 13 % der in Deutschland gelöschten Altfahrzeuge über den regulären Entsorgungsweg zu den Verwertern (UBA 2010). Innerhalb der Verwertungskette ist mit einer Recyclingausbaute von ca. 70 % zu rechnen (Hagelüken et al. 2005a). Im Ergebnis werden nur ca. 29 % der Gesamtmenge der Platingruppenmetalle recycelt. Diese Werte sind Annahmen nach Hagelüken et al. (2005a) für Deutschland, die mangels Daten auf globaler Ebene auf die Welt übertragen werden. Nicht demonitierte und im Fahrzeug belassene Katalysatoren führen zu dissipativen Verlusten. Diese Menge an Platingruppenmetallen wird im Rahmen der gängigen Praxis des Stahlrecyclings dem Kreislauf dauerhaft entzogen.

In den letzten zehn Jahren (1999-2008) sind im Schnitt jährlich und weltweit ca. 154 t Palladium für die Produktion von Autokatalysatoren verwendet worden. Somit ergibt sich anhand der in diesem Absatz genannten Recyclingquote ein durchschnittlicher Palladiumverlust von ca. 110 t/a. Jedoch sind die Recyclingstrukturen in Deutschland nicht mit denen anderer Länder zu vergleichen. Da keine ausreichenden Informationen

¹⁶ Annahme: Export in EU-Mitgliedsländer wie in 2007

zu denen der anderen Länder vorliegen, wird davon ausgegangen, dass die deutsche Recyclingrate eine Obergrenze darstellt. Das Ergebnis dient daher als Abschätzung eines Mindestwertes des globalen Palladiumverlustes.

Obwohl unbekannt ist wie viele der exportierten Fahrzeuge an Ihrem Lebensende tatsächlich dem Recycling zugeführt werden, ist wahrscheinlich, dass zumindest ein Stahlrecycling stattfindet. Somit wird an dieser Stelle davon ausgegangen, dass das in Autokatalysatoren befindlichen Palladium irgendeiner Art von Recycling zugeführt wird und somit nicht als Verlust in oder nach der Nutzungsphase anzusehen ist.

Elektronik und Elektrotechnik

Nach Chancerel (2009) beträgt der Gesamtverlust von Palladium ca. 73 %. Es ist hier zu unterscheiden, wo die Verluste auftreten. Je nach Recyclingstruktur wird ein Großteil der EAG gar nicht erst eingesammelt und fällt als Verlust nach der Nutzungsphase an. Aber auch wenn die Geräte eingesammelt werden, ist die Recyclingquote sehr gering. Eine nicht getrennte Erfassung und eine ungeeignete Behandlung, insbesondere bei der Aufbereitung verursachen hohe Materialverluste (Chancerel 2009). Gemäß Kap. VI.2.5 treten Palladiumverluste in Höhe von ca. 7-21 t/a auf.

Industriekatalysatoren

Insgesamt werden in Deutschland ca. 4.235 kg/a Palladium im Anwendungsbereich Industriekatalysatoren eingesetzt (Hagelüken et al. 2005a). Bis einschließlich 2020 ist davon auszugehen, dass die Gesamtnachfrage nach Palladium (Primär- und Sekundärpalladium) jährlich um ca. 3,8 % steigt. Das bedeutet einen Anstieg der jährlichen Nachfrage bis zum Jahr 2020 um ca. 161 kg Palladium, so dass die Nachfrage auf insgesamt ca. 4.400 kg/a steigt. Die durchschnittliche Recyclingquote des in den verschiedenen Industriekatalysatoren enthaltenen Palladiums wird für Deutschland mit 92 % angegeben (Hagelüken et al. 2005a).

Bezogen auf Deutschland gibt es im Anwendungsbereich Industriekatalysatoren wenig Verbesserungspotential für das Palladiumrecycling – mit Ausnahme der Anwendung in der homogenen Katalyse, bei der ein Defizit im Rücklauf der Katalysatoren festgestellt wurde. Ursache für dieses Defizit ist die geringe Palladiumkonzentration in diesen Katalysatoren, die eine Rückgabe und das Recycling bisher unrentabel machen (Hagelüken et al. 2005a). Technisch wäre es möglich, die Recyclingquote des Palladiums aus diesen Katalysatoren von derzeit 50 % auf 95 % zu erhöhen und damit ca. 34 kg/a Palladium zusätzlich zurückzugewinnen.

Auf globaler Ebene können auf Basis der vorliegenden Fachliteratur keine Angaben zum Einsatz von Palladium im Anwendungsbereich Industriekatalysatoren gemacht werden. Aufgrund der schwierigen Datenlage und der eingeschränkten Relevanz für die Gesamtbewirtschaftung wurde von einer vertiefenden Recherche abgesehen. Eine grobe Abschätzung kann aber für die Welt auf Basis der bekannten Zahlen für Deutschland gemacht werden. Unterstützt durch die Tatsache, dass es bei den Industriekatalysatoren globale Recyclinginfrastrukturen gibt (Hagelüken 2005a) lässt sich eine Gesamtverlustmenge von ca. 13 t/a für die Welt ermitteln.

Zusammenfassend ist festzuhalten, dass in Deutschland ca. 340 kg/a Palladium in diesem Anwendungsbereich verloren gehen und nur geringfügige Verbesserungen möglich sind, da der Recyclinggrad bereits sehr hoch ist.

Schmuck

Schmuckgegenstände werden auf verschiedenen Ebenen recycelt. Zu unterscheiden sind hierbei die Akteure „Industrielle Fertigung“, „Handwerksbetrieb“ und „Endverbraucher“. Sowohl bei der industriellen Fertigung als auch den Handwerksbetrieben werden Produktionsabfälle der Schmuckproduktion systematisch recycelt, wodurch sich die Verluste auf ca. 4 % des Gesamteinsatzes an Palladium beschränken (Hagelüken et al. 2005a). Schmuckgegenstände in den privaten Haushalten werden nach Bedarf, z.B. bei Nichtgefallen, ebenfalls dem Recyclingkreislauf zugeführt. Insbesondere in Hochpreiszeiten – wie wir sie aktuell vorfinden – werden alte Schmuckstücke gern der Verwertung zugeführt. Eine Entsorgung von Schmuck über den Hausmüll ist ebenfalls denkbar, doch wird davon ausgegangen, dass das eher eine Ausnahme darstellt. Ebenfalls ist davon auszugehen, dass eine Menge Schmuck in den privaten Haushalten lagert. Die Größenordnung des Lagers kann nicht angegeben werden.

Das Verbesserungspotential ist hier also relativ gering, da die Prozesse weitgehend industriell bzw. handwerklich optimiert sind.

Dentalmedizin

Die technischen Prozesse zur Rückgewinnung von Palladium sind im Anwendungsbereich Dentalmedizin weit entwickelt. Aufgrund des hohen Materialwertes ist auch hier davon auszugehen, dass kaum Verbesserungspotential besteht. Von kleinen Verlusten (ca. 1 %) während des Scheidungsprozesses im Schmelzwerk abgesehen, fallen hierbei keine Materialverluste an. Bezogen auf die im Zeitraum 1999-2008 durchschnittlich weltweit eingesetzte Menge Palladium und einer Rücklaufquote von ca. 50 % (vgl. Kap. VI.2.5) ist mit einem Verlust von ca. 240 kg/a Palladium zu rechnen. Diese Zahlen

dienen als Mindestabschätzung für den globalen Einsatz in der Dentalmedizin; die tatsächliche Situation in den verschiedenen Regionen der Welt ist unsicher.

Tab. VI-10: Umweltbelastung und jährliche Materialverluste beim Recycling von Palladium

Rezyklierter Stoffstrom	Umweltbelastung	Materialverluste	Bemerkungen
Autokatalysatoren	nicht bekannt	110 t	
Elektroaltgeräte	nicht bekannt	7-21 t	
Industriekatalysatoren	nicht bekannt	> 13 t ¹⁷	
Schmuck	nicht bekannt	nicht bekannt	> 4 % der recycelten Schmuckmenge
Zahnimplantate und Prothesen	nicht bekannt	240 kg ¹⁸	

VI.2.7. Palladium in die Deponien

Palladium gelangt sehr wahrscheinlich in größeren Mengen in die Deponien. Dort liegt es inert vor und verursacht keine Umweltbelastungen.

Tab. VI-11: Umweltbelastungen und jährlich Materialverluste von Palladium in Deponien.

Fraktion/Deponietyp	Umweltbelastung	Materialverluste	Bemerkungen
Elektro- und Elektronikindustrie	nicht durch Palladium	9-21 t	
Dentalmedizin		12 t	

VI.2.8. Palladium in die Umwelt und andere Senken

Neben den Verlusten an Palladium in den zuvor beschriebenen Prozessen konnten nur geringe und nicht zu quantifizierbare Verluste in die Umwelt und anderen Senken in der Literatur gefunden werden. So können Verluste in Form von Stäuben, Schlacken

¹⁷ Abschätzung der Obergrenze unter der Annahme, dass der Einsatz in der chemischen Industrie überwiegend Industriekatalysatoren umfasst, dass kein Lagerzuwachs stattfindet. Dazu wird eine Hochrechnung von Deutschland auf die Welt nach Hagelüken et al. (2005a) durchgeführt.

¹⁸ Hochrechnung auf die Welt nach Hagelüken et al. (2005a)

oder Abwässern auftreten (Lucas et al. 2008). Einzig für den Palladiumverlust in Autokatalysatoren während der Nutzung lassen sich grobe Abschätzungen finden. Details hierzu sind in Kap. VI.2.5 beschrieben.

Tab. VI-12: Umweltbelastungen und jährliche Materialverluste von Palladium in die Umwelt und andere Senken

Fraktion/Deponietyp	Umweltbelastung	Materialverluste	Bemerkungen
Autokatalysatoren		0,88 t	

VI.3. Fazit

VI.3.1. Verbesserungspotential

Die relevanten Umweltbelastungen im Stoffhaushalt von Palladium treten bei der Gewinnung und der Aufbereitung auf. Beim Erzabbau dominiert die tiefgreifende Flächeninanspruchnahme, verbunden mit einer Zerstörung der Landschaft; dies spiegelt sich im TMR wider, der mit ca. 100.000 t/t Palladium anzugeben ist (Saurat / Bringezu 2008). Es ist wünschenswert, künftig vorrangig Minen zu erschließen, die mit einem möglichst geringen ökologischen Rucksack der Abgrabung verbunden sind. Daneben ist die weltweite Verbreitung der besten verfügbaren Technik (BAT) voranzutreiben, um Emissionen zu reduzieren.

Materialverluste

Die größten Materialverluste treten während der Nutzungsphase und dem Recycling auf. In Abhängigkeit von den Strukturen vor Ort erreicht ein Großteil des potentiell zu verwertenden Palladiums erst gar nicht die Sammelstellen. Dies gilt für Fahrzeuge, die im Ausland weiter verwendet werden und für die der Verbleib des Palladiums unklar ist. Ebenso werden viele Kleinstmengen Palladium in EAG nicht dem Recyclingkreislauf zugeführt.

Auch das Palladium in den Gütern, die die Sammelstellen erreichen, wird nicht optimal rückgewonnen, so dass insgesamt hohe Verluste auftreten.

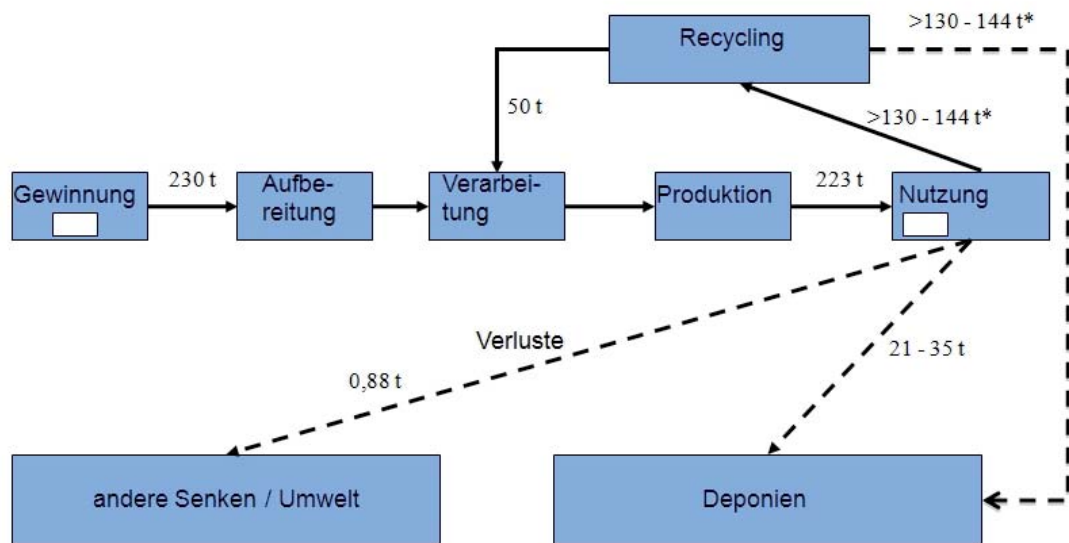
Bezogen auf den Anwendungsbereich Autokatalysatoren treten auch hierzulande Materialverluste auf, die auf Ineffizienzen im System hinweisen. Ursachen potentieller Materialverluste sind beispielsweise (nach Lucas et al. 2008):

- fehlerhafter bzw. unvollständiger Ausbau der relevanten palladiumhaltigen Bauteile,
- im Rahmen der Abfallbehandlung fehlerhafte Zuteilung ausgebaute Pkw-Katalysatoren zu Abfallfraktionen (z.B. Einstufung als Metallschrott),
- mangelhafter Schutz bei der Lagerung von Materialien, beispielsweise in Containern mit mangelhaftem Schutz vor Regen und anderen Umwelteinflüssen,
- unvollständige Erfassung von *Washcoats*¹⁹,
- Verluste über Stäube, Schlacken oder Abwässer.

¹⁹ *Washcoats* sind ein Bauteil des Katalysators zur Erhöhung der Effizienz von Konvertern.

Dies gilt analog für den Bereich der Elektronik. Im Vergleich zu den Autokatalysatoren besteht allerdings in Deutschland noch ein erhebliches Verbesserungspotential. Ein Teil der Elektroaltkleingeräte wie z.B. Mobiltelefone, Toaster und Rasierapparate werden nicht wie eigentlich angedacht an den Sammelstellen abgegeben, sondern über den Hausmüll entsorgt.

Abb. VI-2: Stoffhaushaltssystem Palladium mit jährlichen Flüssen; Bezugsraum: Welt



*Altkatalysatoren werden nach der Nutzungsphase zum einen direkt deponiert, zum anderen erst durch die Altkatalysatoren (Recycling), doch nur zu einem geringen Teil rezykliert. Da eine Trennung der beiden erstgenannten Flüsse nicht möglich ist, wird der Fluss des Pd in den Altkatalysatoren im Palladiumsystem komplett dargestellt als Fluss ins Recycling und von dort in die Deponie.

VI.3.2. Methodische Schwierigkeiten

Relevante Datenlücken

Insbesondere in den Bereichen der Elektro- und Elektronikprodukte ist es schwierig herauszuarbeiten, inwiefern einige Produkte z.B. über den Hausmüll entsorgt und somit den jeweiligen regionalen Mülldeponien zugeführt werden (oder über diverse Exportmöglichkeiten in anderen Ländern weiterverwendet werden, eventuell später recycelt oder anderweitig entsorgt werden). Gleiches gilt in ähnlicher Weise auch für die Autokatalysatoren. Hier ist unklar, welche Mengen an Fahrzeugen exportiert werden. Diese Unklarheit führt zu weiteren Unsicherheiten. So ist nicht gewiss in welcher Form in Importregionen Fahrzeuge einer effizienten Verwertung zugeführt werden.

VI.4. Referenzen

- Angerer, G. / Marscheider-Weidemann, F. / Lüllmann, A. / Erdmann, L. / Scharp, M. / Handke, V. / Marwede, M. (2009): Rohstoffe für Zukunftstechnologien. Schlussbericht vom 02.02.2009, Studie des Fraunhofer Instituts für System- und Innovationsforschung (ISI) und des Instituts für Zukunftsstudien und Technologiebewertung (IZT)
- Boch (2002): Entwicklung und Optimierung von modernen Probenvorbereitungsmethoden zur Ultraspurenbestimmung umweltrelevanter Elemente mittels Graphitofenatomabsorptionsspektrometrie. Dissertation. Fakultät für Chemie, Technische Universität München, München
- Bringezu, S. (2000): Ressourcennutzung in Wirtschaftsräumen: Stoffstromanalysen für eine nachhaltige Entwicklung; Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag
- Buchert, M. / Hermann A. / Jenseit, W. / Stahl, H. / Osyguß, B. / Hagelüken, C. (2007): Optimization of precious metals recycling: Analysis of exports of used vehicles and used electrical and electronic devices at Hamburg port. Umweltbundesamt, Dessau-Roßlau
- Classen, M. / Althaus, H.-J. / Blaser, S. / Tuchschnid, M. / Jungbluth, N. / Doka, G. / Faist Emmenegger, M. / Scharnhorst, W. (2009): Life Cycle Inventories of Metals. Final report ecoinvent data v2.1, Nr. 10. Empa Dübendorf, Swiss Centre for Life Cycle Inventories, Dübendorf, Switzerland; online version: www.ecoinvent.ch
- Destatis (2008a): Umwelt – Abfallentsorgung 2006. Fachserie 19, Reihe 1; Wiesbaden
- Destatis (2008b): Außenhandelsstatistik – Warenverzeichnis 8-Steller: Länderverzeichnis (vorläufige Zahlen für 2006)
- Hagelüken, C. / Buchert, M. / Stahl, H. (2005a): Stoffströme der Platingruppenmetalle – Systemanalyse und Maßnahmen für eine nachhaltige Optimierung der Stoffströme der Platingruppenmetalle. GDMB-Fachausschuss Sondermetalle
- Hagelüken, C. / Buchert, M. / Stahl, H. (2005b): Materials flow of platinum group metals – System analysis and measures for sustainable optimization of the materials flow of platinum group metals.
- Huisman, J. / Magalini, F. / Kuehr, R. / Maurer, C. / Delgado, C. / Artim, E. / Stevels, A. L. N. (2008): Review of directive 2002/96 on waste electrical and electronic equipment (WEEE). United Nations University; Bonn

- IFA [Institut für Arbeitsschutz der Deutschen Gesetzlichen Unfallversicherung] (2009): GESTIS-Stoffdatenbank: Palladium; www.dguv.de/ifa/stoffdatenbank (16.01.2010)
- Johnson Matthey (2009): Marktdaten Palladium 1999-2008; <http://www.platinum.matthey.com/publications/market-data-tables> (20.01.2010)
- KBA [Kraftfahrt-Bundesamt] (2007a): Fahrzeugklassen und Aufbauarten – Löschungen in den Jahren 1950 bis 2006 nach Fahrzeugklassen
- KBA [Kraftfahrt-Bundesamt] (2007b): Jahresbericht 2007
- Lucas, R. / Wilts, H. / Sokolova, I. (2008): MaRes AS 2.2: Weltweite Wiedergewinnung von PGM – Zwischenbericht zur Phase I: Identifizierung der potentiell problematischen Exportströme und signifikanten PGM-Verluste
- Nanostellar (2010): Technology Overview; <http://www.nanostellar.com/technology.htm> (20.10.2010)
- Norilsk Nickel (2009): Pressenachricht (24.09.2009); <http://www.nornik.ru/en/press/news/2420> (20.01.2010)
- ProBas [Prozessorientierte Basisdaten für Umweltmanagement-Instrumente] (2010): Datenbankabfrage der Datenbank ProBas; <http://www.probas.umweltbundesamt.de/php/index.php> (Dezember 2010)
- Renner, H. / Schlamp, G. / Kleinwächter, I. / Drost, E. / Lüscho, H.M. / Tews, P. / Panster, P. / Diehl, M. / Lang, J. / Kreuzer, T. / Knödler, A. / Starz, K. A. / Derrmann, K. / Drieselmann, R. / Peter, C. / Schiele, R. (2005): Platinum Group Metals and Compounds; in: Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry (2007), 6th edition
- Saurat, M. / Bringezu, S. (2008): Platinum Group Metal Flows of Europe, Part I: Global Supply, Use in Industry, and Shifting of Environmental Impacts. *Journal of Industrial Ecology*, Vol. 12, Nr. 5/6, 754-766
- Saurat, M. / Bringezu, S. (2009): Platinum Group Metal Flows of Europe, Part II: Exploring the Technological and Institutional Potential for Reducing Environmental Impacts. *Journal of Industrial Ecology*, Vol. 13, Nr. 3, 406-421
- UBA [Umweltbundesamt] (2010): Daten zur Umwelt: Altfahrzeugaufkommen und -verwertung; <http://www.umweltbundesamt-daten-zur-umwelt.de/umweltdaten/public/theme.do?nodeId=2304>

Umicore (2006): Abgasreinigung von Diesel-Pkw mit Palladium ermöglicht. Pressemitteilung; Hanau

VII. Silber

Martin Erren, Dominic Wittmer und Michael Ritthoff,
Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie

VII.1. Einleitung

VII.1.1. Relevanz

Silber ist – als auch gediegen vorkommendes Edelmetall – eines der am längsten durch den Menschen genutzten Metalle. Die ältesten Funde von Silber stammen aus Ägypten und wurden auf 4157 v. Chr. datiert (Renner et al. 2009). Im Laufe der Geschichte haben sich die Bedeutung von Silber und seine Herstellungstechnologie deutlich gewandelt. Wurde Silber zunächst vor allem als Schmuck- und Münzmetall genutzt, wird es heute hauptsächlich in technischen Anwendungen eingesetzt (Renner et al. 2009, GFMS 2009).

Silber ist aufgrund seiner vielfältigen Einsatzmöglichkeiten in unterschiedlichen Anwendungsbereichen von hoher Relevanz sowohl für etablierte Technologien als auch für Zukunftstechnologien.

Silber wird nicht nur in metallischer Form eingesetzt; auch Silberhalogenide und Silbernitrate haben große technische Bedeutung und sind im Gesamtsystem „Silber“ zu berücksichtigen.

VII.1.2. Charakteristika

Silber ist ein weiches, silberglänzendes Edelmetall mit einer Dichte von 10,49 g/m³; sein Schmelzpunkt liegt bei 961,9 °C und sein Siedepunkt bei 2.210 °C. Silber kann die Oxidationszustände +1, +2 und +3 annehmen. In seinen Verbindungen hat es aber fast ausschließlich die Stufe +1. An Luft und im Wasser ist Silber beständig. Von nicht oxidierenden Säuren (z.B. Salzsäure) wird es nicht angegriffen. Von oxidierenden Säuren (z.B. Salpetersäure) wird es zersetzt. Gegenüber Alkalilaugen ist es resistent.

Aufgrund seines kubisch-flächenzentrierten Kristallgitters lässt sich Silber zu sehr dünnen Folien auswalzen oder zu Drähten ausziehen. Nach Gold ist es das dehnbarste Metall. Silber hat die beste elektrische und thermische Leitfähigkeit aller Metalle; trotz

dieser Eigenschaften wird ihm Kupfer als Kabelmaterial aufgrund des Preisvorteils vorgezogen.

Die Erdkruste hat einen durchschnittlichen Silbergehalt von 0,05-0,1 ppm. Damit ist Silber etwa 100- bis 1.000-mal häufiger als Gold oder Platin. Der TMR (Globaler Materialaufwand, engl.: *Total Material Requirement*) von Silber gehört mit 7.500 t/t Silber zu den höchsten von allen Metallen (Wuppertal Institut 2003).

Die akute und die chronische Humantoxizität von Silber sind geringer als diejenigen anderer Schwermetalle. Die einzige Ursache akuter Silbervergiftungen sind Überdosierungen silberhaltiger Medikamente (Renner 2009). Trotz seiner geringen Toxizität gilt für die maximale Arbeitsplatzkonzentration (MAK) von Silberstaub nicht der allgemeine Staubgrenzwert nach den Technischen Regeln für Gefahrenstoffe (hier: TRGS 900), sondern ein deutlich strengerer Wert von 0,01 mg/m³ (AGS 2009). Hierbei handelt es sich jedoch im eigentlichen Sinne nicht um einen toxikologisch begründeten Wert, sondern um eine Konzentrationsobergrenze, die die Entstehung von Argyrie verhindern soll (Renner et al. 2009), einer irreversiblen, grauen Verfärbung von Haut und Schleimhäuten, die durch Einnahme von Silber hervorgerufen wird (Wadhera / Fung 2005).

Die Toxizität von Silber bzw. Silberverbindungen für Süß- und Seewasserfische variiert stark (Petering / McClain 1991).

Silber wird nicht nur elementar eingesetzt, sondern auch in seinen Verbindungen. Die wichtigsten Silberverbindungen sind Silbernitrat, Silberhalogenide und Silberoxid. Sie werden im Folgenden kurz vorgestellt.

Silbernitrat

Silbernitrat bildet farblose rhombische Kristalle mit einer Dichte von 4,352 g/cm³ und einem Schmelzpunkt von 209 °C. Silbernitrat ist sehr leicht wasserlöslich und wirkt oxidierend auf organische Materialien, hierbei kann es zu Zündung, Verbrennungen und Explosionen kommen (Renner 2009).

Silbernitrat ist das Vorprodukt für die Herstellung anderer Silberverbindungen (insbesondere Silberchlorid, Silberbromid und Silberjodid) (Renner et al. 2009).

Silberhalogenide

Silberchlorid, Silberbromid und Silberiodid sind die drei wichtigsten Silberhalogenide. Ihre bemerkenswerteste Eigenschaft ist, dass sie lichtempfindlich sind und daher vor allem in fotografischen Emulsionen von Filmen und Fotopapieren eingesetzt werden (Renner et al. 2009).

Silberoxid

Silberoxide (Silber(I)- und Silber(II)-oxid) werden in Batterien eingesetzt.

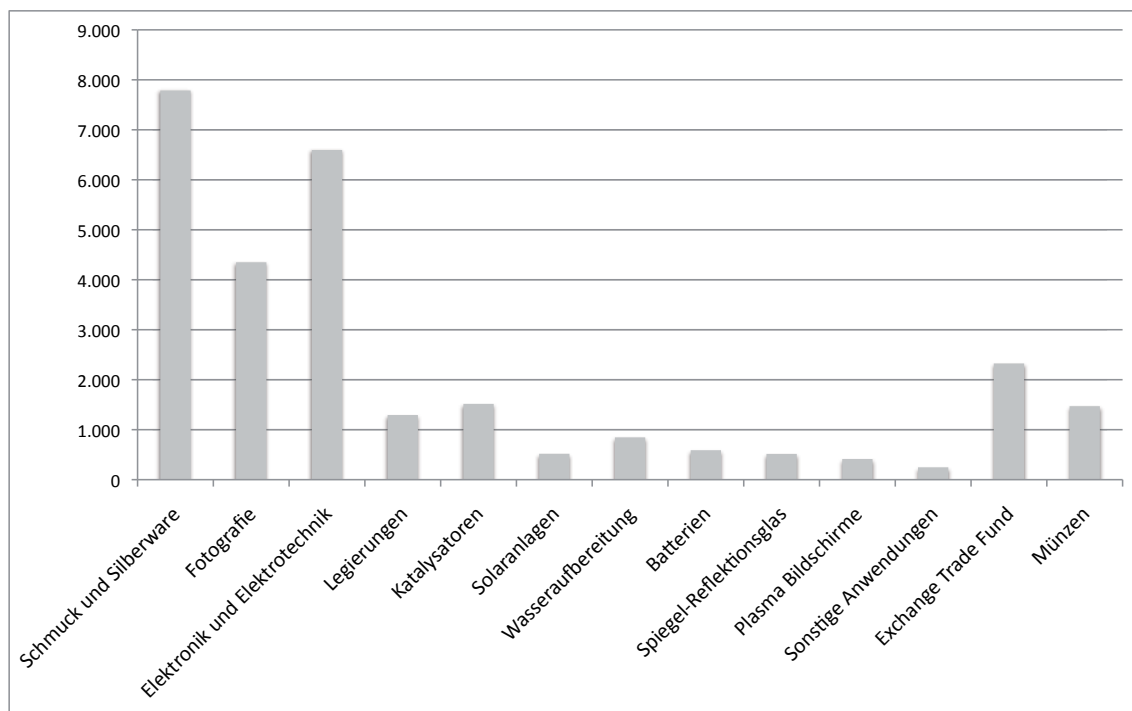
Silber(I)-oxid ist ein braunes Pulver mit kubischer Kristallstruktur und einer Dichte von 7,143 g/cm³. Es zersetzt sich bei 150 °C langsam und bei 300 °C schnell (Renner et al. 2009).

Silber(II)-oxid ist ein grau-schwarzes Pulver. Bei 85 °C zersetzt es sich langsam und über 100 °C schnell (Renner et al. 2009).

VII.1.3. Anwendungsbereiche

Insgesamt wurden im Jahr 2008 25.896 t Silber produziert (GFMS 2009). Den größten Anteil am Silbereinsatz hatten industrielle Anwendungen, vor allem in der Elektrotechnik. Über 50 % des Silbers wurden in industriellen Anwendungen eingesetzt. Daneben wird Silber in der Schmuckindustrie mit 18 %, in der Fotografie mit 12 %, für Münzen und Medaillen mit 7 % und für Silberwaren mit 6 % eingesetzt (GFMS 2009). Abb. VII-1 zeigt eine detaillierte Übersicht über die Einsatzgebiete für das Jahr 2007.

Abb. VII-1: Weltweiter Einsatz von Silber im Jahr 2007. Angaben in Tonnen



Quelle: FORTIS Bank (2009)

Bei der Gesamtbetrachtung fällt auf, dass die eingesetzte Menge Silber im Zeitraum vom 1998 bis 2008 stagniert, die einzelnen Anwendungsbereiche aber starken Schwankungen unterworfen sind. So ist die Menge für die industrielle Fertigung stark

angestiegen (+42 %). Neben diesem Einsatzbereich ist auch in der Münz- und Medailen-Produktion mehr Silber eingesetzt worden (+133 %). In der Silberschmuckproduktion ist keine signifikante Veränderung zu verzeichnen, bei der Produktion von Silberware und in der Fotoindustrie jedoch ein deutlicher Rückgang (-54 % bzw. -50 %).

Industrielle Fertigung

In der industriellen Fertigung kennt man zahlreiche Anwendungen, die zusammengekommen den Hauptanteil des Einsatzes von Silber und Silberverbindungen ausmachen. Innerhalb dieses Anwendungsbereiches sind die meisten Produkte elektrische oder elektronische Produkte. Dies umfasst unter anderem:

- Elektrische Leiter, Schalter, Kontakte und Sicherungen,
- Dickschicht-Paste (für gedruckte Schaltungen / Leiterplatten),
- Mehrschicht-Keramikkondensatoren und Membranschaltern,
- Silberschichten für elektrisch beheizte Windschutzscheiben in Fahrzeugen,
- Fertigung von Photovoltaikzellen,
- Beschichtung von Festplatten, DVD, Spiegeln, Glas und
- Batterien.

Schmuck

Im Zeitraum von 1998 bis 2008 stagnierte die Nachfrage nach Silber zur Verwendung als Schmuck. Sie liegt bei ca. 5.000 t jährlich und schwankt nur geringfügig (The Silver Institute 2007).

Fotografie

Die klassische chemische Fotografie (Silberfotografie) nutzt die Lichtempfindlichkeit von Silberhalogeniden aus. Aufgrund des raschen Übergangs von der Silberfotografie zur digitalen Fotografie ist der Einsatz von Silber in diesem Bereich stark rückläufig. Dieser Rückgang ist insbesondere in Europa und Amerika zu beobachten, in anderen Regionen ist er weniger ausgeprägt. Da für die Ausbelichtung digitaler Bilder auf Fotopapier auch Silber benötigt wird, ist davon auszugehen, dass aber weiterhin Silber im Bereich der Fotografie eingesetzt und benötigt wird (Hillard 2009a).

Silberware

Traditionell wird Silber im Haushalt vor allem als Silberbesteck verwendet. Die Produktion von Silberware ist stark rückläufig (The Silver Institute 2007). Den stärksten Rückgang haben die wichtigen Produktionsländer Indien (-59 %), Italien (-67 %) und Deutschland (-55 %) zu verzeichnen. Unter den wichtigsten Produktionsländern weisen nur China und Russland ein deutliches Produktionswachstum auf. Hier ist in den Jah-

ren von 1995-2005 für China ein Wachstum von 263 % und für Russland von 216 % zu erkennen.

Münzen und Medaillen

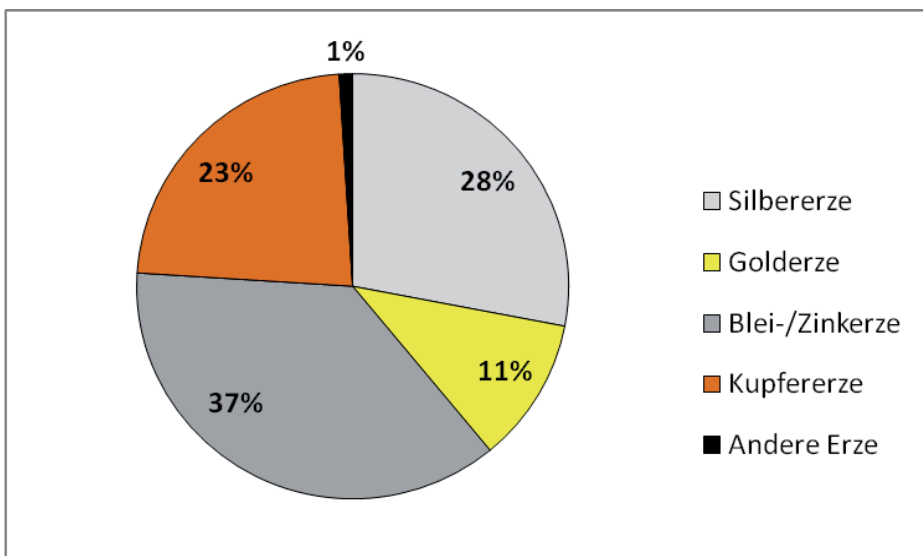
Silber wird bereits seit der Antike als Münzmetall verwendet. Aufgrund der starken Wertsteigerung von Silber nach dem Zweiten Weltkrieg, woraufhin der Metallpreis den Nominal-Wert der Münzen überstieg, haben Silbermünzen als Kursmünzen stark an Bedeutung verloren. Es wird jedoch in vielen Ländern Anlagemünzen und Medaillen aus Silber hergestellt.

VII.2. Umweltbelastungen und Materialverluste

VII.2.1. Abbau

Silber kommt in der Natur als gediegenes Silber, gebunden in Mineralen von Silbererzen und als Bestandteil anderer Erze vor. Die Bauwürdigkeitsgrenze von Silbererzlagern liegt bei etwa 450 g/t. Der größte Teil des jährlich gewonnenen Silbers stammt jedoch nicht aus Silbererzen, sondern wird als Nebenprodukt bei der Produktion anderer Metalle gewonnen (GFMS 2009, Hillard 2009b, Pohl 2005) (Abb. VII-2).

Abb. VII-2: Erztypen, die als Ausgangsrohstoffe zur Silbergewinnung genutzt werden. Die Erztypen sind nach ihren Hauptprodukten benannt



Quelle: GFMS (2009)

Die Förderung von Silber betrug im Jahr 2008 ca. 21.000 t (nach U. S. Geological Survey: 20.900 t; nach The Silver Institute (2009): 21.191 t). Nach dem U. S. Geological Survey stehen dieser Förderung Reserven von 270.000 t und eine Reservenbasis von 570.000 t gegenüber, Silberressourcen werden jedoch nicht publiziert¹. Damit weist Silber eine statische Reichweite von nur 13 Jahren auf. Es ist anzumerken, dass die Mengen der Reserven über einige Jahre praktisch konstant blieben und die Reservenbasis sogar gestiegen ist: Für 1995 wurden die Reserven mit 280.000 t und die Reservenbasis mit 420.000 t angegeben (Reese 1996).

¹ Als weitere Silberressource sind die Ozeane zu nennen: Der durchschnittliche Silbergehalt des Meerwassers liegt bei 0,001 ppm. Jedoch lassen sich diese Silberressourcen von insgesamt ca. 10.000 Mt derzeit nicht wirtschaftlich gewinnen (Renner et al. 2009).

Bei den Silbererzen lassen sich zwei Lagerstättentypen unterscheiden, zum einen magmatogene, zum anderen sedimentogene Lagerstätten. Während der Erzgewinnung aus beiden Lagerstättentypen kommt es zu Silberverlusten, die mit den Abfallerzen zur Geländeauffüllung ausgebracht werden.

Während der Gewinnung kommt es zu Silberverlusten, die regional unterschiedlich hoch sind (Classen et al. 2009) (Tab. VII-1).

Tab. VII-1: Ausbeute bei der Silbergewinnung nach Ländern: Verhältnis gewonnenes Silber zu gesamtem im Erz enthaltenen Silber

Land	Ausbeute
Schweden	90 %
Papua Neuguinea	90 %
Chile	85 %
Peru	85 %
Kanada	85 %
USA	88 %
Südafrika	97 %
Australien	92 %
Tansania	92 %

Quelle: Classen et al. (2009)

Bei der Silbergewinnung beträgt der Durchschnitt der weltweiten Silberausbeute 90 %, der Materialverlust entsprechend 10 % (Classen et al. 2009). Bezogen auf die weltweite Silbergewinnung im Jahr 2008 in Höhe von ca. 21.200 t Silber erhält man einen Silberverlust von ca. 2.400 t, der in Form von Abraum in die Umwelt gelangt.

Tab. VII-2: Umweltbelastungen und jährliche Materialverluste bei der Gewinnung von Silbererzen und silberführenden Blei- und Kupfererzen

Erztypen	Umweltbelastung	Jährliche Materialverluste	Bemerkungen
Silbererz	Landschaftsveränderungen durch Flächeninanspruchnahme (nicht verwertete Extraktion, Abfälle), bei sulfidischen Erzen: Versauerung von Grundwasser und Oberflächengewässer (<i>acid mine drainage</i>)	2.400 t Verluste	Summe der Silberverluste aller Erztypen, 2008: ca. 10 %
Blei-/Zinkerz			
Kupfererz			
Golderz			

Quelle: eigene Darstellung, Lanzano et al. (2006)

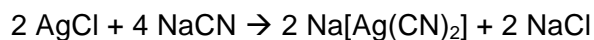
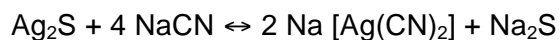
VII.2.2. Aufbereitung

Die Aufbereitung der verschiedenen Erztypen erfolgt auf unterschiedliche, dem Erztyp jeweils angepasste Art und Weise.

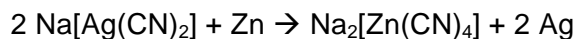
Aufbereitung von Silbererzen

Bei der Gewinnung von Silber aus Silbererzen werden diese zunächst nass vermahlen. Aus dem Schlamm wird das Silber dann hydrometallurgisch durch Cyanidlaugerei extrahiert (Abb. VII-4). Feststoffe werden durch Eindicker und Filter entfernt. Dabei wird das Silber aus dem zerkleinerten Silbererz mit 0,1- bis 0,2-prozentiger Natriumcyanidlösung bei guter Durchlüftung ausgelaugt.

Hierbei gehen vorhandenes Silber, Silbersulfid oder Silberchlorid als Dicyanoargentat(I) ($[\text{Ag}(\text{CN})_2]^-$) entsprechend folgender Reaktionsgleichungen in Lösung:



Anschließend wird aus den klaren Lösungen durch Zugabe von Zinkstaub Rohsilber gefällt:



Die Ausbeute in der Cyanidlaugerei hängt vom Ausgangserz ab und erreicht bei der Laugung reiner Silbererze bis zu 98 %, bei Anwesenheit anderer Erze jedoch oft nur 80 % (Renner et al. 2009).

Daneben besteht auch die Möglichkeit, Silbererze in der Blei- oder Kupferverhüttung einzusetzen und das Silber später abzutrennen. Das kann insbesondere dann vorteilhaft sein, wenn die begleitenden Gangminerale den Blei- oder Kupferverhüttungsprozess positiv beeinflussen (Renner 2009).

Bedeutender als die Gewinnung aus Silbererzen ist die Gewinnung aus Blei- und Zinkerzen.

Aufbereitung silberhaltiger Bleierze

Bei der Silbergewinnung aus Bleierzen folgt das im Erz enthaltene Silber im Hüttenprozess dem Blei. Es wird nicht in den Schlacken abgetrennt. Bei der Abtrennung von Silber aus Blei kommen unterschiedliche Verfahren zur Anwendung:

Beim *Pattinson-Prozess* macht man sich eine Phasentrennung beim Abkühlen zunutze, bei der sich eine feste Bleiphase bildet und sich Silber in der verbleibenden Schmelze bis zu einer Konzentration von 2,5 % sammelt. Das Verfahren ist jedoch nicht sehr effizient.

Dominierend ist daher heute der *Parkes-Prozess*. Hierbei wird Zink in die verunreinigte Bleischmelze gerührt. Die Verunreinigungen lösen sich im Zink, schwimmen als Zinkkruste auf dem Bleibad auf und werden dort abgezogen. Das Zink wird anschließend abdestilliert. Der dabei entstehende Rückstand kann bis zu 50 % Silber enthalten. Daneben besteht er aus anderen Edelmetallen, Zink, Kupfer Arsen, Antimon und Wismut (Renner et al. 2009, Sutherland et al. 2009). Aus dem Rückstand wird dann durch selektive Oxidation (auch Treibarbeit oder Kuppelation genannt) Silber gewonnen. Hierbei wird der zu reinigende Rückstand zusammen mit Blei aufgeschmolzen. Die Bleischmelze und unedle Verunreinigungen werden durch eingeblasene Luft oxidiert. Zurück bleiben die Edelmetalle, die anschließend weiter raffiniert werden können. (Renner et al. 2009)

Aufbereitung silberhaltiger Anodenschlämme der Kupfergewinnung

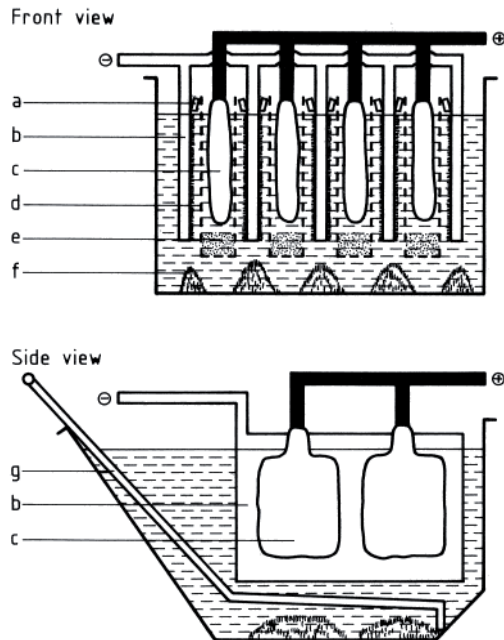
Ein dritter wichtiger Rohstoff für die Silbergewinnung sind Kupfererze. Das in Kupfererzen enthaltene Silber wird bei der Herstellung von Kupfer –wie auch andere Edelmetalle – im Rohkupfer konzentriert (Lossin 2001). Das im Rohkupfer enthaltene Silber setzt sich bei der Elektroraffination des Kupfers in den Anodenschlämmen ab. Für die Silbergewinnung werden aus den Anodenschlämmen zunächst Rohkupferpartikel abgesiebt. In einer weiteren Vorbehandlung werden dann durch Schwefelsäure bei 60-95 °C Kupfer, Kupfertelluride und Kupferselenide herausgelöst. Anschließend sind eine Reihe verschiedener Verfahrensalternativen möglich:

- Eine Raffination des Anodenschlamms kann durch mehrfache Röstung und Schwefelsäurebehandlung erfolgen. Hierbei können auch Silberverluste durch die Lösung in Schwefelsäure auftreten,
- Der Anodenschlamm kann durch Sulfatierung und anschließender Extraktion von Verunreinigungen mit heißem Wasser erfolgen.
- Der Anodenschlamm kann hydrometallurgisch mit oxidierenden Säuren gelöst werden. Hierbei bleibt das Silber im Rückstand und kann weiter verarbeitet werden.
- Bei der Verarbeitung von Anodenschlamm im Doré-Ofen wird der Anodenschlamm mit schlackebildenden Zuschlägen versetzt und für mehrere Tage aufgeschmolzen. Mit den sich bildenden Schlacken werden die meisten Verunreinigungen entfernt. Das Silber aus dem Doré-Prozess erreicht eine Reinheit von 99,0-99,5 %.

Unabhängig vom Erztyp und der Vorbehandlung wird das gewonnene Rohsilber mithilfe des Möbius-Verfahrens (oder der elektrochemisch vergleichbaren Balbach-Thum-Elektrolyse) gereinigt (Abb. VII-3). Hierbei wird das Rohsilber in Anodenplatten gegossen. Als Elektrolyt dient salpetersaure Silbernitratlösung. Als Kathoden werden Edelstahlplatten (oder Feinsilber) geschaltet. Bei der Elektrolyse gehen Silber und unedlere Metalle in Lösung, edlere Metalle fallen in den Anodensack und bilden den Anodenschlamm, der zur Gewinnung von Gold oder Platin verwendet wird. An der Kathode

scheidet sich reines Silber ab. Die Abscheidung erfolgt in Form von verästelten Kristallen, sogenannten Dendriten, die durch einen Abstreifer von der Kathode entfernt werden, um einen Kurzschluss zu vermeiden.

Abb. VII-3: Möbius-Verfahren. a) Kratzer; b) Kathode (Edelstahl), c) Anode (Rohsilber), d) Anodensack, e) Anodenschlamm (Gold, Platingruppenmetalle), f) Silberkristalle, g) Kratzer



Quelle: Renner et al. (2009)

Bei der Gewinnung von Silber aus den unterschiedlichen Erzen können z. T. erhebliche Silberverluste von bis zu 20 % auftreten. In aller Regel werden die Verluste jedoch deutlich geringer sein.

Die Aufbereitung im Möbius-Verfahren führt insgesamt zu nur geringen Silberverlusten. Diese sind laut Lanzano et al. (2006) geringer als 0,1 %. Insgesamt entstehen auf diesem Wege weltweit maximal 21 t Silberverluste im Jahr.

Die Gewinnung von Silber kann mit teils erheblichen Umweltbelastungen verbunden sein. Relevant sind insbesondere die eingesetzten Hilfsstoffe Natriumcyanid, Schwefelsäure und Blei (Tab. VII- 3).

Tab. VII-3: Umweltbelastungen und jährliche Materialverluste bei der Aufbereitung von Silber aus Silber-, Blei- und Kupfererzen.

Erztyp	Umweltbelastung	Materialverluste	Bemerkungen
Silbererz	Belastungen von Abwasser mit Natriumcyanid und Belastungen der Luft mit Natriumcyanidstaub sind möglich.	120-1.470 t/a Rückstände in Lösung	2-20 % des Silbergehaltes der Silbererze (Produktion aus Silbererzen 5.880 t/a)
Bleierz	Bleistaub	Nicht quantifiziert, geringe Verluste in die Bleiproduktion	
Kupfererz	Abwasserbelastung mit Schwefelsäure SO ₂ - und As-Emissionen teilweise erheblich (Röstverfahren bei Cu-Erz-Raffination) (Schüller et al. 2008) Schwermetallstäube wie z.B. Cadmium und Bismuth Säurenebel aus HCl, Salpetersäure, NO _x und organischen Verbindungen wie VOC oder PCDD/F	Nicht quantifiziert, abhängig vom Verfahren	Bei Kupfer-Silber-Minen sind die Umweltbelastungen z. B. aus der Röstung anteilmäßig auf die Produkte zu allozieren
alle Erztypen		< 21 t/a	Reinigung im Möbius-Verfahren < 0,1 % Verlust

VII.2.3. Verarbeitung

Zur Weiterverarbeitung von Silber zu Legierungen und Halbzeug sind weitere Verfahrensschritte erforderlich. Bei der Herstellung von Halbzeugen wird das reine Silber zu Stangen, Drähten oder Granulat verarbeitet. Um die Aufnahme von Sauerstoff im Silber zu verhindern, muss das Silber unter reduzierenden Bedingungen erschmolzen werden (Renner et al. 2009). In flammenbeheizten Öfen kann hierbei Kohlenmonoxid entstehen. Relevante weitere direkte Umweltbeeinträchtigungen treten bei der Verarbeitung nicht auf. Indirekte Umweltbelastungen können durch die eingesetzte Energie entstehen.

Bei der Herstellung von Silberlegierungen müssen diese ebenfalls unter einer Schutzgasatmosphäre geschmolzen werden. Hierbei kann neben Stickstoff, Argon und Wasserstoff auch Kohlenmonoxid eingesetzt werden.

Bei der Verarbeitung von Silber kommt es zu keinen nennenswerten Silberverlusten (Lanzano et al. 2006). In Europa (ohne Osteuropa) werden ca. 7.300 t Silber (inkl. Importe) zu Legierungen und Halbzeug verarbeitet, weltweit sind dies ca. 26.000 t. Weltweit werden neben der eigentlichen Minenproduktion zudem ca. 5.500 t Silber aus dem Recyclingkreislauf in die Verarbeitung eingebracht. Ein hier möglicher Überschuss (im Jahr 2008: ca. 4.000 t) beeinflussen das Silberlager.

Tab. VII-4: Umweltbelastungen und jährliche Materialverluste bei der Verarbeitung von Silber

Halbzeug	Umweltbelastung	Materialverluste	Bemerkungen
Stangen, Drähte, Granulate	Kohlenmonoxidemissionen möglich	Keine	
Silberlegierungen und Silberverbindungen	Kohlenmonoxidemissionen möglich	Keine	

Neben der Herstellung von Silberhalbzeugen ist die Herstellung von Silberverbindungen relevant; die wichtigste dieser Verbindungen ist Silbernitrat. Silbernitrat wird einerseits als solches bei der Herstellung von Produkten eingesetzt, andererseits ist es auch ein wichtiges Zwischenprodukt für weitere Silberverbindungen, insbesondere für die Silberhalogenide.

Silbernitrat wird durch Umsetzung von Silber mit heißer Salpetersäure hergestellt. Hierbei entstehen Stickstoffdioxid und Stickstofftrioxid. Beide werden in aller Regel wieder für die Herstellung von Salpetersäure genutzt (Renner et al. 2009).

Die Silberhalogenide werden aus wässrigen Silbernitratlösungen durch Zusatz von Lösungen der Alkalimetall-Halogenen hergestellt (Renner et al. 2009). Informationen zu möglichen Umweltbeeinträchtigungen liegen nicht vor.

VII.2.4. Produktion silberhaltige Produkte

Im Jahr 2008 wurden weltweit insgesamt 27.600 t Halbzeug und Silberlegierungen zu verschiedensten silberhaltigen Produkten verarbeitet. Die Umweltbelastungen bei der Herstellung der einzelnen Produkte variieren dabei sehr stark.

Industrielle Fertigung

Die industrielle Fertigung umfasst eine Vielzahl von verschiedenen Produkten. Insgesamt wurden im Jahr 2008 ca. 14.000 t für verschiedene Anwendungsbereiche eingesetzt. Mit ca. 6.600 t ist die Elektrik/Elektronik der bedeutendste Anwendungsbereich. Weitere wichtige Anwendungsbereiche sind Legierungen mit 1.300 t/a Silber und Katalysatoren mit 1.500 t/a Silber. Darüber hinaus werden in sonstigen Anwendungen insgesamt 3.100 t/a Silber verarbeitet; dies umfasst:

- Solarpanel,
- Wasseraufbereitung,
- Batterien,
- Spiegel,
- Plasmabildschirme,
- Nahrungsmittelhygiene (z.B Warenregale mit Silberbeschichtung),
- Medizinische Anwendungen,
- Radio-Frequency-Identifikation-Etiketten (sogenannte RFID Tags),
- Chemische Entgiftung (medizinische Entgiftungskuren mit kolloidalem Silber),
- Fasern/Textilien (Nanotechnologie) und
- Holzschutzmittel.

Umweltbelastungen – jenseits vom Energieverbrauch durch die Herstellung von Silberprodukten – sind dort zu erwarten, wo Silber nicht als Metall, sondern in Silberverbindungen eingesetzt wird. Das trifft für den Einsatz in Batterien, Spiegeln und Holzschutzmitteln (neuartige Anwendung) zu. Hier sind Emissionen von Silberoxid und Silbernitrat zu erwarten. Quantitative Angaben hierzu konnten nicht ermittelt werden.

Aufgrund des hohen Wertes von Silber sind die Produktionsprozesse darauf ausgerichtet, Silberverluste zu vermeiden, so dass es während des Produktionsprozesses nur zu sehr geringen Materialverlusten kommt.

Schmuck, Silberwaren, Medaillen und Münzen

Schmuck, Silberwaren, Medaillen und Münzen werden zum größten Teil industriell hergestellt. Relevante Umweltbelastungen außer den energiebedingten (hier nicht näher untersucht) treten in der Regel nicht auf. Es ist davon auszugehen, dass die Materialverluste aufgrund des hohen Wertes von Silber gering sind.

Fotografie

Silberhalogenide (Silberchlorid, Silberbromid und Silberjodid) werden in der chemischen Fotografie (Silberfotografie) in Filmen und Fotopapieren eingesetzt. Die Silberhalogenide sind die eigentlichen lichtempfindlichen Bestandteile der fotografischen Emulsionen.

Wichtige Schritte zur Herstellung fotografischer Materialien sind die Emulsionsherstellung, der Beguss (Beschichtung) und die Aufarbeitung. Dabei eingesetzte Stoffe sind Polyester, Cellulosetriacetat oder Papier für die Unterlage und Silber, Gelatine sowie spezielle organische Chemikalien für die Emulsionen (Fonds der chemischen Industrie 1999).

Die Herstellung der fotografischen Emulsionen ist nicht mit relevanten Umweltbeeinträchtigungen verbunden. Materialverluste können bei der Konfektionierung der Filme und Fotopapiere auftreten.

Tab. VII-5: Umweltbelastung und jährliche Materialverluste bei der Produktion von silberhaltigen Produkten

Anwendungsbereich	Produkt	Umweltbelastung	Materialverluste	Bemerkungen
Industrielle Fertigung			sehr gering	
Schmuck, Silberwaren, Medaillen, Münzen			gering	
Fotografie	Filme, Fotopapiere	Abwasser-/ Klärschlammbelastung	Verschnitt: nicht quantifiziert	

VII.2.5. Nutzung

Während der Nutzungsphase gehen in Europa (ohne Osteuropa) lediglich ca. 32 t Silber verloren (Bezugsjahr 1997) (Lanzano et al. 2006). Unter der Annahme, dass weltweit ähnliche Verluste auftreten, erhält man durch Hochrechnung einen weltweiten Silberverlust von ca. 500 t.

Einige silberhaltige Produkte gelangen nicht ins Recycling sondern werden stattdessen als Abfall entsorgt. So traten in Europa (ohne Osteuropa) in diversen Abfallfraktionen ca. 1.310 t/a Silberverluste auf, was 68 % des jährlichen Silberflusses in die Nutzung entspricht (Stand 1997) (Lanzano et al. 2006). Durch Hochrechnung werden die Daten für Europa auf die Welt übertragen: Bezogen auf das Jahr 2008 wird damit der weltweite Silberverlust auf ca. 18.360 t geschätzt. Ein Großteil des in Produkten eingesetzten Silbers wird somit direkt auf die Deponien verbracht; ein kleinerer Teil von ca. 1080 t/a gelangt in die Umwelt und andere Senken (landwirtschaftlichen Flächen, Straßenbau, Grundwasser und Sedimente und Verklappung auf See).

Abfallfraktionen mit relevanten Silberfrachten sind:

- Hausmüll in Form von Leiterplatten, Fotofilme, Fotografien, Zahnfüllungen, Münzen und Silberwaren und Silberoxid-Batterien,
- Elektro- und Elektronikschrotte in Form von Leiterplatten,
- Industrieabfälle aus der Fotoindustrie, von Zahnärzten und Krankenhäusern,
- Abwässer aus der Fotoindustrie, von Zahnärzten und Krankenhäusern, Produktion von Leiterplatten und der chemischen Industrie (Produktion von Katalysatoren) und
- Sonderabfälle in Form von Silberoxide-Batterien und Abfall aus Zahnarztpraxen.

Industriell gefertigte Produkte

Im Bereich der industriellen gefertigten Produkte kommt es insbesondere bei der Elektrik und Elektronik zu Verlusten. Probleme treten bei der Rückführung von EAG-Schrott auf. Beispielsweise enthalten allein die Produktgruppen Mobiltelefone und Computer im Jahr 2008 555 t Silber, was 3 % der globalen Silberjahresproduktion entspricht (Hagelücken 2009).

Möglich sind Verluste auch durch eine unsachgemäße Entsorgung von Elektro- und Elektronikaltgeräten in Exportländern, aber auch durch die Entsorgung von z.B. Mobiltelefonen im Hausmüll.

In Deutschland wurden im Jahr 2008 ca. 155.000 t neue Elektro- und Elektronikgeräte, gebrauchte Geräte und Elektro- und Elektronik-Altgeräten nach Asien und Afrika exportiert (UBA 2010). Der Silberanteil dieser exportierten Güter ist hier nicht zu nennen. Ebenfalls ist unklar, ob und wie eventuell Recyclingstrukturen in den Importländern vorhanden sind.

Schmuck, Silberwaren und Münzen und Medaillen

In diesem Anwendungsbereich ist nicht mit nennenswerten Materialverlusten zu rechnen. Schmuck, Silberwaren und Münzen werden bei Nichtgebrauch in der Regel gelagert oder via Edelmetallhändler dem Recyclingkreislauf zugeführt.

Fotografie

Die chemische Fotografie beruht auf der Lichtempfindlichkeit der Silberhalogenide. Die belichteten Silberhalogenide können durch die Entwickler zu metallischem Silber reduziert werden und bauen so das Bild auf. Bei der Schwarz-Weiß-Fotografie verbleibt das bildgebende Silber im Film und im Fotopapier. Das nicht belichtete Silber wird mit dem Fixierbad entfernt und kann daraus zurückgewonnen werden.

In der Farbfotografie wird auch das belichtete Silber aus Filmen und Fotopapier entfernt. Der Bildaufbau wird durch zusätzliche, in den Emulsionen enthaltene Farbkuppler erzeugt. Das unbelichtete Silber wird wie in der Schwarz-Weiß-Fotografie durch das Fixierbad entfernt, das belichtete durch ein zusätzliches Bleichbad. Aus beiden Bädern kann das Silber zurückgewonnen werden (Renner et al. 2009).

Ein Großteil der Schwarz-Weiß-Fotografie findet heute im Rahmen des medizinischen Röntgens statt. Für Röntgenaufnahmen gibt es gesetzlich vorgeschriebene Rücklaufzeiten, so dass hier eine nahezu vollständige Rückführung des Silbers gegeben ist (Fonds der chemischen Industrie 1999). Schwarz-Weiß-Positive und -Negative, die sich in der Regel beim Endverbraucher ansammeln, gelangen hingegen nicht ins Recycling.

Umweltbelastungen können insbesondere durch den Einsatz der Fotochemikalien entstehen. Hierbei kommt eine Vielzahl, teils reizender oder toxischer Stoffe zum Einsatz.

Eine Entsorgung der fotografischen Lösungen über das Abwasser ist jedoch generell nicht gestattet.

Inwieweit während der Nutzungsphase Verluste anfallen, hängt maßgeblich vom Verhalten der Konsumenten ab. Verluste entstehen in Abhängigkeit davon, ob die silberhaltigen Produkte wie Negative, Schwarz-Weiß-Fotos und Röntgenbilder tatsächlich dem Recycling zugeführt werden. Auf das Recycling im Anwendungsbereich Fotografie wird näher in Kapitel VII.2.6 eingegangen.

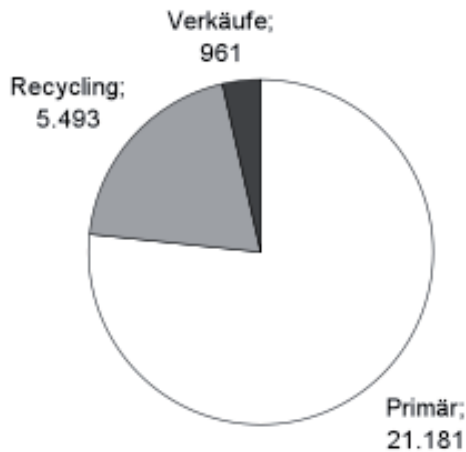
Tab. VII-6: Umweltbelastung und jährliche Materialverluste bei der Nutzung von Silber

Anwendungsbereich	Umweltbelastung	Materialverluste	Bemerkungen
Industrielle Fertigung (inkl. EuE-Produkte)		unbekannt	
Fotografie	durch nicht sachgerecht entsorgte Fotochemikalien möglich	unvollständige Rückgewinnung aus den fotografischen Lösungen und nicht recycelte s/w-Filme und Bilder	
Schmuck		Vernachlässigbar	
Silberwaren		0 t	
Münzen		0 t	
Total		19.440 t	eigene Hochrechnung nach Lanza et al. (2006)

VII.2.6. Recycling von Silber

Silberrecycling ist seit Langem etabliert und wird in den meisten Anwendungsgebieten angewandt. Die Wiedergewinnung von Silber wird für das Jahr 2008 zu fast 5.500 t/a angegeben; der Anteil der Sekundärproduktion an der gesamten Silberproduktion betrug damit ca. 20 % (Abb. VII-4). Andere Quellen geben mit ca. 14.000 t eine noch größere Sekundärproduktion an (FORTIS Bank 2009).

Abb. VII-4: Anteil von Primärproduktion (Primär), Sekundärproduktion (Recycling) und staatlichen Verkäufen (Verkäufe) am weltweiten Silberangebot 2008



Quelle: GFMS (2009)

Metallisches Silber lässt sich auf einfache Weise wieder einschmelzen. Zum Erreichen der gewünschten Reinheiten sind gegebenenfalls zusätzlich Raffinationsschritte durchzuführen.

Es ist unklar, wie groß die Verluste beim Recycling von Silber und Silberverbindungen sind. Ein Teil der Abweichungen zwischen den unterschiedlichen Angaben zum Silberrecycling könnte auf Verluste im Recyclingsystem zurückzuführen sein. Die Ausbeute beim Recycling von Edelmetallen wird jedoch allgemein mit ca. 95 % als hoch eingeschätzt (Hagelüken et al. 2005). Beim Recycling von Schmuck, Silberwaren und Münzen/Medaillen treten nur geringe Verluste auf. Möglicherweise entstehen jedoch größere Verluste beim Recycling von Silberverbindungen. Die Problematik der Silberbilanzierung innerhalb der Abfallwirtschaft wird auch von anderen Untersuchungen bestätigt (Lanzano et al. 2006).

Weltweit wurden 2008 ca. 3.740 t Silber aus altem Silberschmuck und 141 t aus Altmünzen zurückgewonnen (FORTIS Bank 2009).

Tab. VII-7: Umweltbelastungen und jährliche Materialverluste beim Recycling von Silber

Rezyklierter Stoffstrom	Produkt	Umweltbelastung	Materialverluste	Bemerkungen
Silberschrott	Silber	Abhängig von den notwendigen Verfahrensschritten, siehe Aufbereitung	290 t	

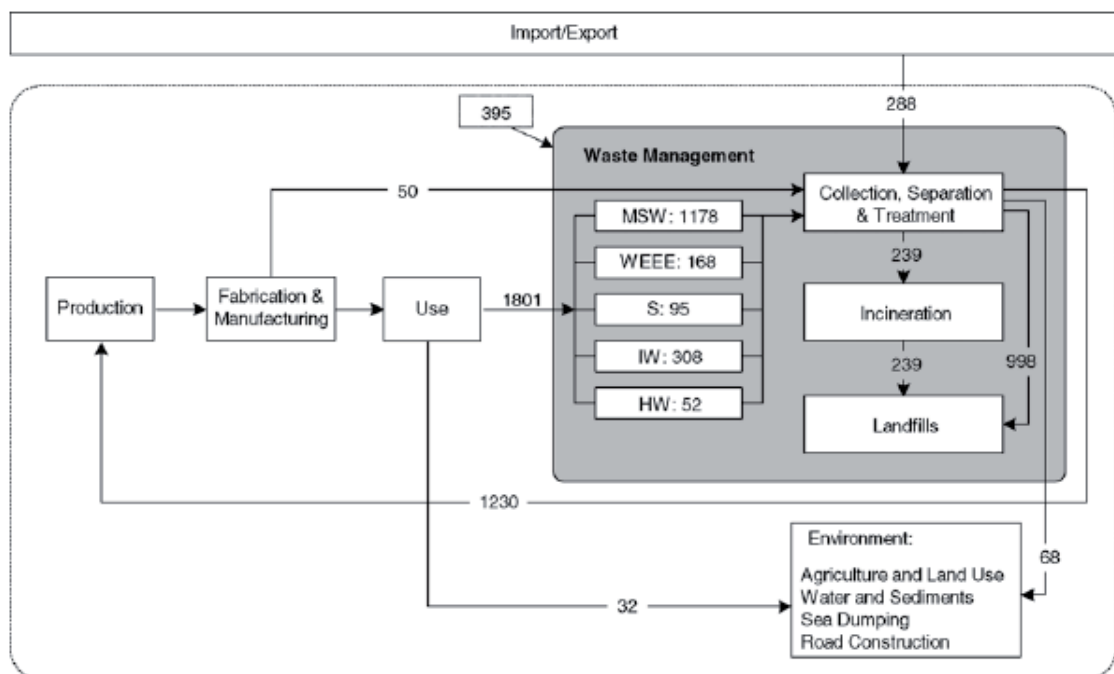
VII.2.7. Silber in die Deponien, in die Umwelt und andere Senken

Lanzano et al. (2006) hat im Rahmen der Analyse der europäischen Silberflüsse auch das Entsorgungssystem betrachtet (Abb. VII-5)². Diese Ergebnisse wurden mithilfe einer groben Hochrechnung auf die Welt übertragen (Tab. VII-8).

Demnach werden in die Deponien jährlich ca. 18.700 t/a verbracht, davon entfallen ca. 290 t/a auf das Recycling. Der Rest des Eintrags in die Deponien fällt nach der Nutzungsphase an.

Deutlich weniger Silber wird in die Umwelt emittiert und andere Senken verbracht. Von den insgesamt 4.100-5.500 t/a stammt ungefähr die Hälfte aus der Gewinnung, ca. ein Viertel aus der Aufbereitung und dem Recycling und nur ca. 10 % aus der Nutzung.

Abb. VII-5: Silberfrachten in den europäischen Abfallströmen. MSW: municipal solid waste; WEEE: waste from electrical and electronic equipment; S: sewage; IW: industrial waste; HW: hazardous waste



Quelle: Lanzano et al. (2006)

² Diese Studie bezieht sich auf die für den Silberhaushalt Europas relevanten Länder; die nicht relevanten wurden vernachlässigt.

Tab. VII-8: Jährliche Materialverluste durch Eintrag von Silber in Deponien und die Umwelt

	Materialverluste	Bemerkungen
Deponien	ca. 18.700 t/	
Umwelt	ca. 4.100-5.500 t/a	

Quelle: eigene Hochrechnung auf Basis von Lanzano et al. (2006)

VII.3. Fazit

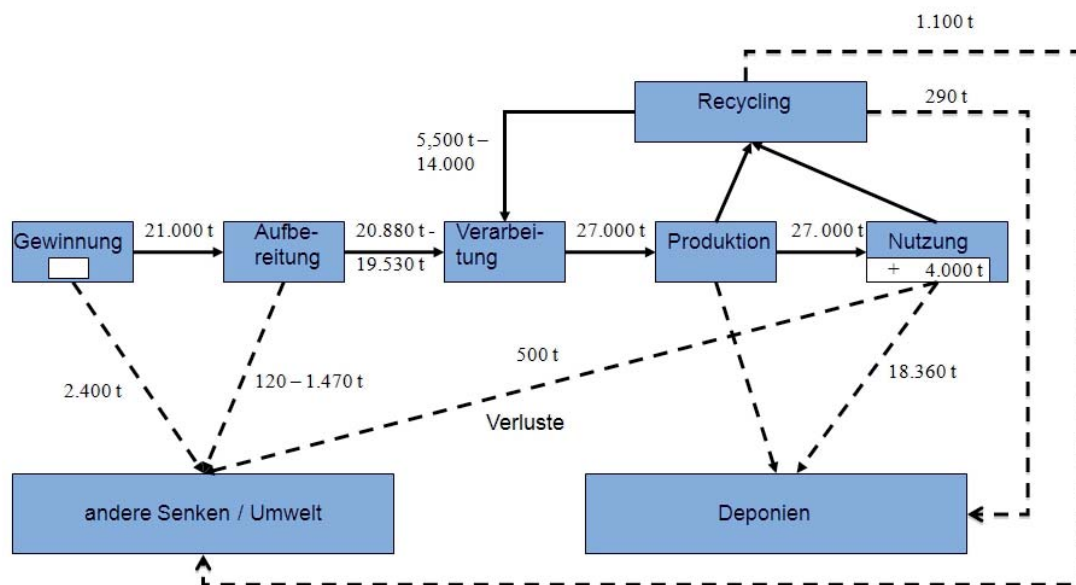
VII.3.1. Verbesserungspotential

Die relevanten Umweltbelastungen des Stoffhaushalts von Silber treten bei der Gewinnung und der Primärproduktion auf. Es sind erhebliche Extraktionsmengen erforderlich, was sich im hohen TMR von 7.500 t/t widerspiegelt (Wuppertal Institut 2003). Daneben können infolge der eingesetzten Verfahren und Hilfsstoffe bei der Gewinnung und Aufbereitung erhebliche Umweltbelastungen auftreten. Neben der Auswahl möglichst umweltfreundlicher Verfahren und Einsatzstoffe ist insbesondere bei der Aufbereitung von Silber auch der Einsatz nachsorgender Umwelttechnik notwendig. Dies sollte auch außerhalb Europas flächendeckend Verbreitung finden.

Die bedeutendsten Silberverluste sind mit dem Einsatz in einer Vielzahl industriell gefertigter Produkte, insbesondere Elektronik, verbunden, die als Abfall auf Deponien gelangen (insgesamt ca. 18.700 t). Hier bestehen erhebliche Potenziale in der Verbesserung von Sammlung, Aufbereitung und Recycling sowie im einen darauf ausgelegten Produktdesign.

Daneben treten Verluste bei der Gewinnung auf, die eine Verringerung der Mengen aufbereiteter Erze bewirken. Die Silberfrachten dieser Erze betragen ca. 2.400 t/a. Es ist zu prüfen, ob eine Erhöhung der Ausbeute durch konsequente Anwendung der besten technischen Verfahren (BAT) zur Gewinnung erreicht werden kann.

Abb. VII-6: Stoffhaushaltssystem Silber mit jährlichen Flüssen, Bezugsraum: Welt



VII.3.2. Methodische Schwierigkeiten

Relevante Datenlücken

Die Datenlage hinsichtlich der spezifischen Emissionen bei der Gewinnung und Verarbeitung von Silber ist insgesamt als schlecht zu beurteilen. In vielen Fällen können allenfalls qualitative Annahmen getroffen werden.

Informationen zu Materialverlusten sind nur eingeschränkt verfügbar. Insbesondere jene während und nach der Nutzungsphase basieren auf groben Hochrechnungen und sind nicht vollständig konsistent.

VII.4. Referenzen

- AGS [Ausschuss für Gefahrstoffe] (2009): Technische Regeln für Gefahrstoffe: Arbeitsplatzgrenzwerte TRGS 900 (Ausgabe: Januar 2006, zuletzt geändert und ergänzt: GMBI Nr. 28, 605) (02.07.2009)
- Butterman, W. C. / Hilliard H. E. (2005): Mineral Commodity Profile: Silver. Open-File Report 2004-1251, U. S. Geological Survey, Reston, Virginia
- Fonds der Chemischen Industrie (Hg.) (1999): Textheft Fotografie. Folienserie des Fonds der Chemischen Industrie, Nr. 26; Frankfurt
- FORTIS Bank (Hg.) (2009): The silver book
- GFMS (2009): World Silver Survey 2009: A Summary. Report produced for The Silver Institute
- Hagelüken, C. (2009): „Urban Mining“ ist wichtiger Beitrag zum Klimaschutz. *Trade-News Emissions* (Dow Jones), Vol. 5, 14-16
- Hilliard, H. E. (2009a): Minerals Yearbook 2007: Silver [Advance Release]. U. S. Geological Survey
- Hilliard, H.E. (2009b): Mineral Commodity Summaries: Silver. U. S. Geological Survey
- Lanzano, T. / Bertram M. / de Paloa, M. / Wagner, C. / Zyla, K. / Graedel, T. E. (2006): The contemporary European silver cycle. *Resources, Conservation and Recycling*, Vol. 46, 27–43
- Petering, H. G. und McClain, C. J. (1991): Silver; in: Merian, E.: Metals and Their Compounds in the Environment; Weinheim
- Pohl, W. L. (2005): Mineralische und Energie-Rohstoffe, 5. Auflage; Stuttgart
- Reese. R. G. (1996): Mineral Commodity Summaries: Silver. U. S. Geological Survey
- Renner, H. / Schlamp, G. / Zimmermann, K. / Weise, W. / Tews, P. / Dermann, K. / Knödler, A. / Schröder, K.-H. / Kempf, B. / Lüscho, H. M. / Drieselmann, R. / Peter, C. / Schiele, R. (2009): Silver, Silver Compounds, and Silver Alloys; in: Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry (2009), electronic version
- Schüller, M. / Estrada, A. / Bringezu, S. (2008): Mapping Environmental Performance of International Raw Material Production Flows: a Comparative Case Study for the Copper Industry of Chile and Germany. *Minerals and Energy*, Vol. 23, Nr. 1, 29-45
- The Silver Institute (2007): Silver Jewelry Report

- UBA [Umweltbundesamt] (2010): Export von Elektroaltgeräten – Fakten und Maßnahmen; Dessau-Roßlau
- Universität Regensburg (2008): Demonstrationsversuche im Sommersemester 2008. Institut für Anorganische Chemie – Lehrstuhl Prof. Dr. A. Pfitzner.
- USGS [U. S. Geological Survey] (2005): Silver: End-Use Statistics (last modification: 01.09.2005)
- USGS [U. S. Geological Survey] (2008): Silver Statistics (November 2008)
- Wadhera, A. / Fung, M. (2005): Systemic argyria associated with ingestion of colloidal silver. *Dermatology Online Journal*, Vol. 11, Nr. 1, 12
- Wuppertal Institut (2003): Materialintensitäten von Materialien und Energieträgern im Überblick (MIT-Wertetabelle), Version 2 vom 28.10.2003;
http://www.wupperinst.org/info/entwd/index.html?beitrag_id=437&bid=169

VIII. Titan

Michael Ritthoff,
Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie

VIII.1. Einleitung

VIII.1.1. Relevanz

Unter den Konstruktionswerkstoffen ist Titan das teuerste Metall und wird im Vergleich zu Stahl und Aluminium nur in geringen Mengen hergestellt und eingesetzt. Ein wichtiger Grund hierfür ist die aufwendige und energieintensive Herstellung. Damit hat es relativ zu seiner Einsatzmenge eine hohe Umweltrelevanz.

Aufgrund seiner hohen Festigkeit und seiner geringen spezifischen Dichte ist Titan gut für Leichtbau geeignet. Seine Hauptverwendung als Metall findet es daher in Luft- und Raumfahrzeugen. Titan findet darüberhinaus aufgrund seiner Korrosionsfestigkeit in sehr unterschiedlichen Bereichen für potenziell innovative oder umweltfreundliche Lösungen Verwendung (z.B. Turbinenschaufeln oder Teile von Meerwasserentsalzungsanlagen).

Titan wird jedoch nicht nur als reines Titanmetall eingesetzt, sondern auch als Legierungselement für Stahl. Der dominierende Einsatz von Titan erfolgt nicht als Metall, sondern als Titandioxid. Titandioxid wird insbesondere als Pigment in Farben und Lacken, in Papier und in Kunststoffen verwendet und ist für rund 96 % der Titanverwendung verantwortlich (Gambogi 2009a).

Da die metallische und die oxidische Phase des Titans weitgehend getrennt bewirtschaftet werden, sind diese auch in dieser Betrachtung der einzelnen Lebenszyklusabschnitte getrennt zu diskutieren. Eine Verknüpfung der beiden Stoffströme findet nicht statt. In der vorliegenden Betrachtung wird der Schwerpunkt auf Titanmetall gesetzt.

VIII.1.2. Charakteristika

Titan bildet ein silberweiß glänzendes Leichtmetall. Es tritt in zwei Modifikationen auf: Die hexagonale α -Form geht bei 882 °C in die kubische β -Form über.

Titan ist mit einer durchschnittlichen Konzentration von 0,6 % in der Erdkruste das neunthäufigste Element. Es tritt in vielen Mineralen, Gesteinen und Böden auf, häufig in geringen Konzentrationen. Titanminerale wie Rutil, Ilmenit oder Anatas sind jedoch selten (Sibum et al. 1999). Der TMR (Globaler Materialaufwand, engl.: *Total Material Requirement*) von Titan wurde bisher noch nicht detailliert untersucht; eine Abschätzung ergibt einen Wert von ca. 90-100 t/t Titan (nach Sibum et al. (1999) und weiterer Fachliteratur), wobei eine sehr große Streuung entlang der verschiedenen Lagerstättentypen festzustellen ist. Bei armen Seifenlagerstätten kann der TMR nach diesen Abschätzungen bis zu 1.000 t/t Titan erreichen.

Physikalische Eigenschaften von Titan (Sibum et al. 1999):

- Schmelzpunkt: 1.668 °C
- Siedepunkt: 3.500 °C
- Dichte (hochrein): 4,5 g/cm³ (25 °C)
- Elastizitätsmodul: 100-110 GPa (25 °C)

Titan ist nur sehr gering toxisch. Intoxikationen treten praktisch nur bei beruflicher Exposition auf. Aufgrund seiner sehr geringen Toxizität und guten Korrosionsbeständigkeit wird Titan auch in medizinischen Implantaten eingesetzt.

Die Toxizität von Titanverbindungen ist unterschiedlich. Die am häufigsten genutzte Verbindung Titandioxid (TiO₂) ist inert. Auch bei höheren Dosen und Aufnahme über den Magen-Darmtrakt konnten keine toxischen Effekte beobachtet werden.

In Tierversuchen konnten jedoch bei langanhaltender Staubexposition Erkrankungen des Atemtrakts beobachtet werden (Sibum et al. 1999). Hierbei ist davon auszugehen, dass es sich um allgemeine Staubwirkungen handelt. In der Liste der maximalen Arbeitskonzentrationen (MAK) gilt für Titandioxid (TiO₂) nur der allgemeine Feinstaub-Grenzwert „da dem Ausschuss für Gefahrenstoffe (AGS) bisher keine über die unspezifische Wirkung auf die Atemorgane hinausgehende Erkenntnisse bekannt wurden“ (AGS 2009).

VIII.1.3. Anwendungsbereiche

Titan kommt in metallischer Form aufgrund seiner hohen Festigkeit und guten Korrosionsbeständigkeit in einer Reihe unterschiedlicher Anwendungen zum Einsatz. Dabei substituiert es häufig andere metallische Werkstoffe, die die gewünschten Eigenschaften nicht in gleicher Weise abdecken können. Es kann Nickel- und Kobalt-Legierungen bei Temperaturen im Bereich von 500-900 °C und Stahl im Temperaturbereich von 200-500 °C ersetzen. Die Einsatzgrenze bei guter Festigkeit und Korrosionsbeständig-

keit liegt bei etwa 550 °C (Knittel 1997). Im Folgenden sind die wichtigsten Anwendungen aufgelistet (Sibum et al. 1999):

- in Luftfahrzeugen sowohl in Triebwerken als auch in der Flugzeughülle; der Anteil des Einsatzes in der zivilen Luftfahrt nimmt zu,
- in der chemischen Industrie aufgrund der hohen Beständigkeit, um die Kontamination mit Eisen zu verringern, (z.B. in Anlagen zur Herstellung von Salpetersäure, Soda, Chlor, Chlordioxid, Harnstoff, Essigsäure, Acetaldehyd, Kunststoffen) (Knittel 1997),
- in technischen Prozessen als Katalysator,
- in der Lebensmittelindustrie aufgrund der guten Beständigkeit gegenüber organischen Säuren,
- in der Papier- und Textilindustrie aufgrund der guten Beständigkeit gegenüber den dort eingesetzten Bleichmitteln,
- in Kühlkreisläufen und bei der Entsalzung von Meerwasser aufgrund der guten Beständigkeit gegenüber Salzwasser auch bei erhöhten Temperaturen,
- in Kraftfahrzeugen, z.B. Federn,
- in der Medizintechnik für Implantate (künstliche Gelenke, Zahnimplantate, Gehäuse von Herzschrittmachern).

Daneben gibt es noch eine Reihe anderer Anwendungen, in denen Titan in zumeist geringen Mengen eingesetzt wird.

Neben der Verwendung als Titanmetall ist Titan bzw. Ferrotitan ein Legierungsmetall für Stahl. Titan wird vor allem als Mikrolegierungsbestandteil für Stahl verwendet. Es verleiht Stahl bereits in Konzentrationen von 0,01-0,1 % Massenanteil eine hohe Zähigkeit, Festigkeit und Duktilität. In rostfreien Stählen verhindert Titan die interkristalline Korrosion. Titanstahl ist besonders widerstandsfähig gegen Stoß und Schlag und wird daher unter anderem auch zur Herstellung von Turbinen und Eisenbahnrädern eingesetzt. Durch Zusatz von Titan erreicht man bei pulvermetallurgisch hergestellten Dauermagneten hohe Koerzitivkraft¹ und Remanenz² (Knittel 1997).

Neben dem Einsatz als Metall und als Legierungselement kommt Titan vor allem in Form von Titandioxid zum Einsatz. Titandioxid wird in großen Mengen als nicht toxisches Pigment in Farben und Lacken, Papier und Kunststoffen eingesetzt.

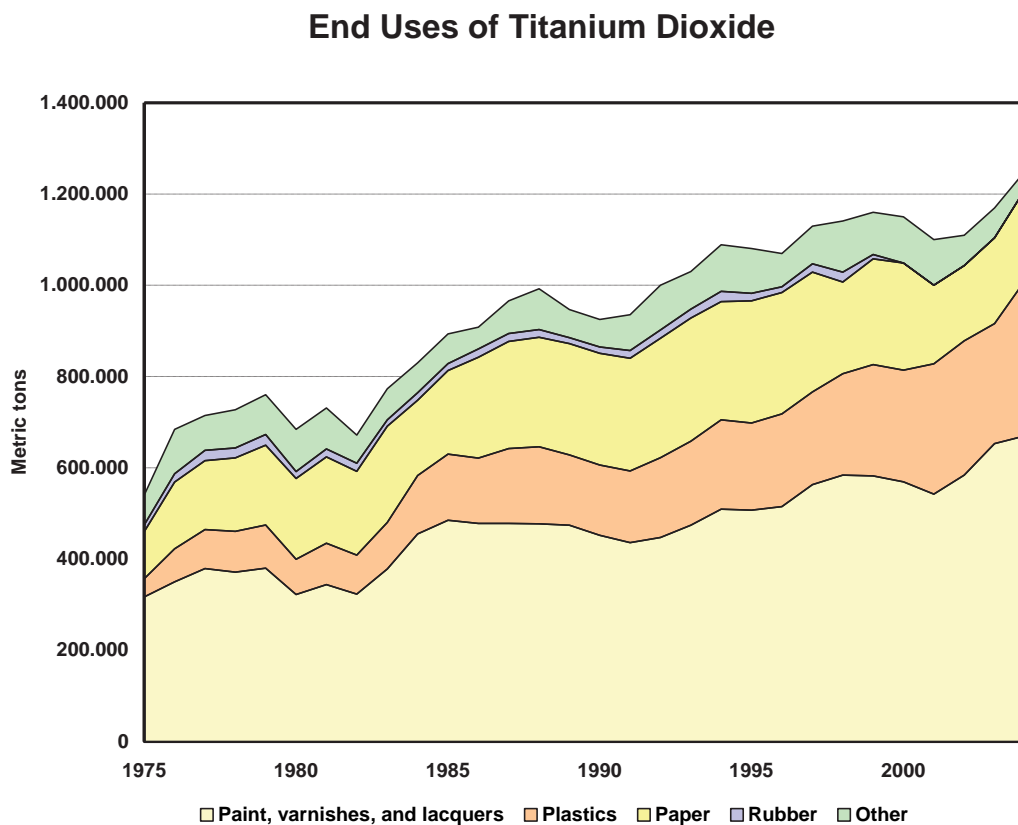
¹ magnetische Feldstärke, die notwendig ist, um eine ferromagnetische Substanz vollständig zu entmagnetisieren

² Restmagnetisierung nach Entfernen eines extern aufgetragenen magnetischen Feldes

Quantitative Angaben zu den Anwendungen

Nur rund 4-5 % des Titangehalts der geförderten Titanrohstoffe wird in metallischer Form eingesetzt. Der größte Teil der Titanminerale wird zu Titandioxid verarbeitet. Globale Daten zur Verwendung von Titandioxid sind nicht verfügbar, lediglich für die Vereinigten Staaten sind Daten erhältlich. Es kann davon ausgegangen werden, dass diese Daten hinsichtlich ihrer Verteilung auf verschiedene Einsatzfelder repräsentativ für die weltweite Verwendung von Titandioxid sind. Die größten Mengen an Titandioxid werden als weißes Pigment in Farben und Lacken eingesetzt, gefolgt von Kunststoffen und Papier. Andere Verwendungen sind demgegenüber nachrangig (vgl. Abb. VIII-1).

Abb. VIII-1: Entwicklung der Verwendung von Titandioxid in den Vereinigten Staaten im Zeitraum 1975-2005

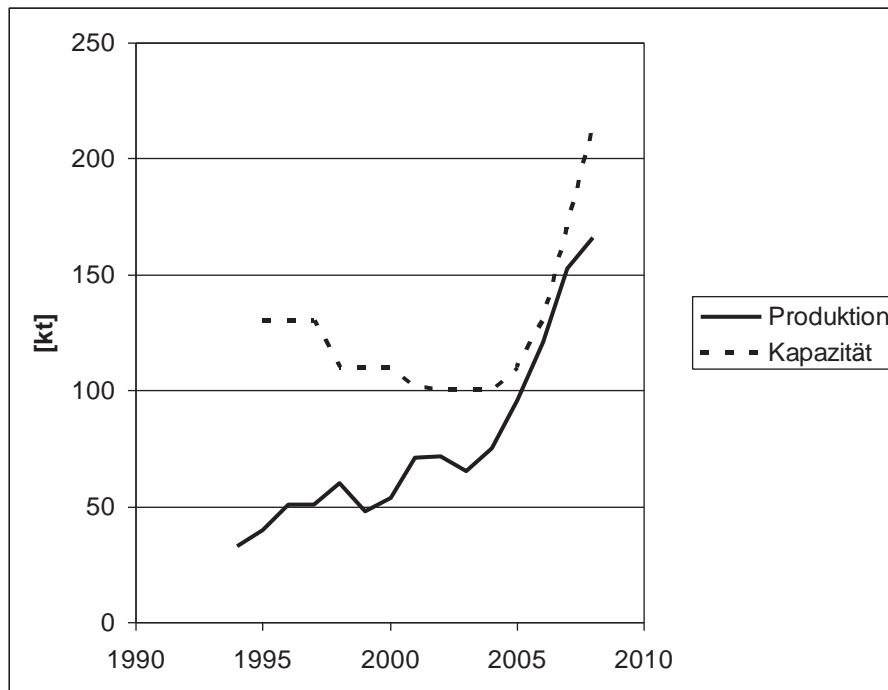


Quelle: USGS (2008a)

Die weltweite Produktion von Titanschwamm, dem ersten Zwischenprodukt bei der Herstellung von primärem Titanmetall, ist in den letzten Jahren deutlich gestiegen (Abb. VIII-2). Aufgrund unvollständiger Angaben muss jedoch von möglicherweise erheblichen Fehlern bei der Produktionsmenge ausgegangen werden. Auffallend ist insbesondere die erhebliche Differenz zwischen Produktionskapazität und Produktionsmengen, die über viele Jahre beobachtet werden konnte. Aufgrund der geringen An-

zahl von Produzenten einerseits und der hohen Relevanz militärischer Anwendungen andererseits kann davon ausgegangen werden, dass ein erhebliches Interesse besteht, die genauen Produktionsmengen geheim zu halten.

Abb. VIII-2: Entwicklung der weltweiten Produktionsmenge und Produktionskapazität von Titanschwamm im Zeitraum 1993-2008. Produktionsmenge ohne Vereinigte Staaten



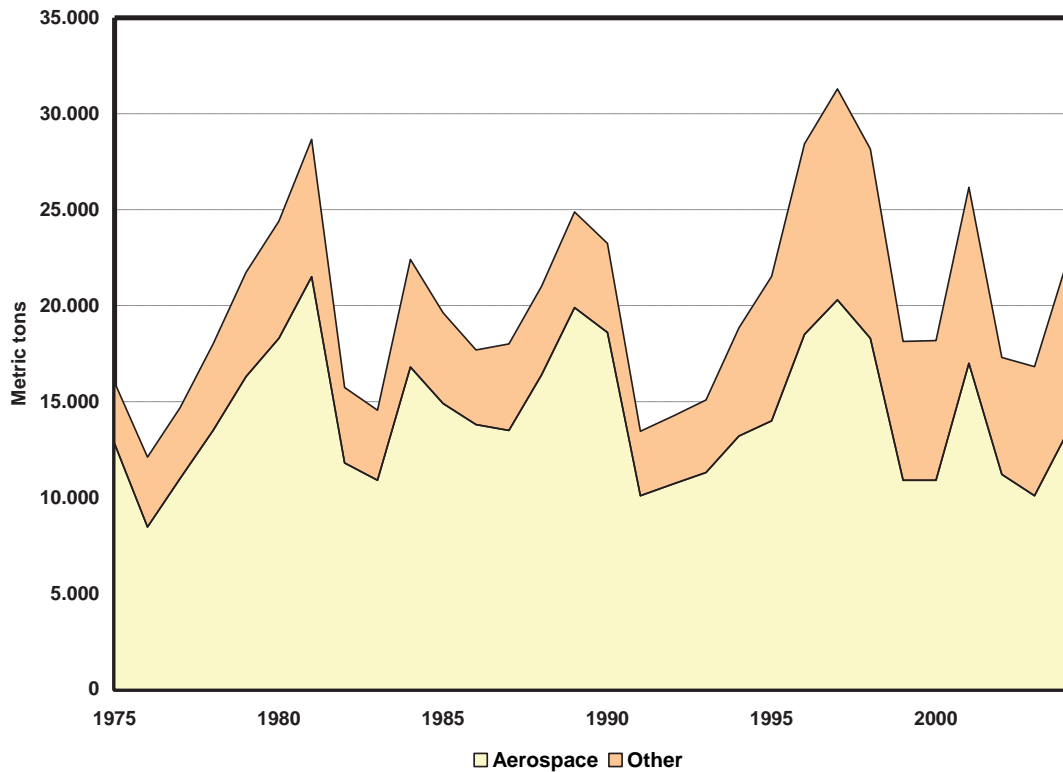
Quelle: Gambogi (1996-2009)

Die Produktionsmenge von Titanschwamm ist in der Gemeinschaft Unabhängiger Staaten (GUS) nach 1990 deutlich zurückgegangen. Wurden 1991 noch 95.500 t Titanschwamm in den GUS-Ländern hergestellt, waren es 1994 nur noch 20.000 t. Bis 1999 ist die Produktion wieder auf 31.700 t gestiegen. Heute sind die GUS-Länder wieder die dominierenden Produzenten von Titanschwamm. Wesentliche Ursache der starken Schwankungen in den GUS-Ländern dürfte der weitgehende Zusammenbruch der Rüstungsindustrie, und damit des Hauptabnehmers gewesen sein.

Quantitative Angaben zur Verwendung von Titan sind nur für die Vereinigten Staaten erhältlich (vgl. Abb. VIII-3). In den Vereinigten Staaten wird Titan (Angaben beziehen sich auf die Menge Titanschwamm) überwiegend in der Luftfahrt eingesetzt. Genauere Aufschlüsselungen sind nicht verfügbar – auch nicht zur quantitativen Differenzierung der sonstigen Verwendung.

Abb. VIII-3: Entwicklung der Verwendung von Titanschwamm in den Vereinigten Staaten im Zeitraum 1975-2005

End Uses of Titanium Sponge Metal



Quelle: USGS (2008)

Auch in absehbarer Zukunft wird der Titanverbrauch durch die Titandioxidproduktion bestimmt werden. Beim Verbrauch von Titandioxid wird von einer dreiprozentigen jährlichen Steigerung des Verbrauchs ausgegangen (Gambogi 2009a).

Es wird jedoch aufgrund starker Nachfrage aus der Luftfahrt-, Rüstungs- und sonstigen Industrien auch für die Titanschwammproduktion mit einer steigenden Nachfrage und Produktion gerechnet. Für das Jahr 2015 wird von einer Produktionskapazität für Titanschwamm von 350.000 t/a ausgegangen (Gambogi 2009a), was ausgehend von einer Kapazität von 213.000 t/a im Jahr 2008 einer durchschnittlichen jährlichen Wachstumsrate von 6,5 % entspricht.

VIII.2. Umweltbelastungen und Materialverluste

VIII.2.1. Abbau

Titanerze werden sowohl aus primären magmatischen Lagerstätten (z.B. in Kanada, Vereinigte Staaten, Finnland und Norwegen), als auch aus sekundären Lagerstätten wie Seifen gewonnen.

Die Gewinnung der Titanminerale erfolgt im Tagebau (Gambogi 2009a). Der Aufwand für den Abbau hängt im starken Maße vom Lagerstättentyp ab. Es kommen beim Abbau je nach Lagerstättentyp Schwimmbagger oder herkömmliche Trockenabbauverfahren zum Einsatz. Genaue Verbrauchs- und Emissionsdaten zur Gewinnung von Titanerzen sind nicht verfügbar.

Zur Produktion von Titan werden unterschiedliche Mineralien aus unterschiedlichen Erztypen genutzt. Die wichtigsten Mineralien sind in diesem Zusammenhang Ilmenit (FeTiO_3), Anatas (TiO_2) und Rutil (TiO_2) (Gambogi 2009b, Pohl 2005). Perovskit (CaTiO_3) Lagerstätten sind derzeit ohne Bedeutung für die Titanproduktion, können jedoch unter Umständen langfristig wirtschaftliche Bedeutung gewinnen (Sibum et al. 1999, Pohl 2005, Knittel 1997). Derzeit ist die Nutzung dieser primären Lagerstätten gegenüber den einfacher abzubauenen Seifenlagerstätten nicht lohnend.

Die Weltförderung von Ilmenit als dem mengenmäßig bedeutendsten Titanmineral lag im Jahr 2008 bei 5,64 Mt (Reserven von ca. 1.400 Mt), die Weltförderung von Rutil lag im Jahr 2008 bei 0,608 Mt (Reserven von 45 Mt). Die Ressourcen für Anatas-, Ilmenit- und Rutil-Erze werden zusammen auf über 2.000 Mt geschätzt (Gambogi 2009b). Bezogen auf die Reserven an Ilmenit und Rutil ergibt sich eine statische Reichweite von über 200 Jahren. Damit kann die Verfügbarkeit von Titanrohstoffen als langfristig gesichert angesehen werden.

Tab VIII-1: Mineralien mit bedeutender Nutzung für die Titangewinnung, k. A.: keine Angabe

Mineralien	Formel	Weltförderung 2008 [Mt]	Titangehalt (%)
Ilmenit	FeTiO_3	5,64	31,5
Anatas	TiO_2	0,608	60,0
Rutil	TiO_2	k. A.	60,0
Perovskit	CaTiO_3	k. A.	35,0

Der Titangehalt der für die Titangewinnung genutzten Erze streut aufgrund von häufigen Verwachsungen mit anderen Mineralen stark (Pohl 2005). In sekundären Lagerstätten werden Ilmenitkonzentrationen bis 70 % erreicht. Die Bauwürdigkeitsgrenze streut für die verschiedenen Mineralien, für Ilmenit in Seifen und anderen Lockergesteinen liegt sie jedoch bei nur 1 %, für Rutil bei 0,1 % (Pohl 2005).

Es ist zu beachten, dass die Bauwürdigkeit von Seifen aufgrund der einfachen Aufbereitung und der Möglichkeit, vergesellschaftete Schwerminerale wie Zirkon zu gewinnen, unterhalb der durchschnittlichen Titankonzentration der Erdkruste (4.200 ppm) liegt (Pohl 2005). Die Qualität der Konzentrate aus solchen Seifenlagerstätten ist aufgrund der mineralogischen Zusammensetzung derjenigen der Konzentrate anderer Lagerstätten daher überlegen (Pohl 2005).

Umweltbelastungen und Materialverluste

Bei Seifenlagerstätten werden aufgrund des geringen Gehaltes an Titanmineralien sehr große Extraktionsmengen durchgesetzt. Hierbei ist von einem erheblichen Landschafts- und Flächenverbrauch durch die Tagebaue auszugehen.

Auch der Abbau von Titanmineralien in primären Lagerstätten ist mit relevanten Umwelteingriffen verbunden. In Tellnes (Norwegen) liegt eine der größten Ilmenitlagerstätten. Der Abbau erfolgt im Tagebau mit Bohr- und Sprengverfahren. Für 0,58 Mt Ilmenitkonzentrat, entsprechend 0,258 Mt Titan, werden in dieser Mine ca. 2 Mt Erz und 1,6 Mt Nebengestein abgebaut (Malz 2008). Derartige große Abbaumengen bewirken starke landschaftliche Eingriffe. Die Tiefe des Tagebaus in Tellnes beispielsweise hat heute ca. 150 m erreicht, geplant sind bis zu 400 m (Malz 2008).

Tab. VIII-2: Umweltbelastungen und jährliche Materialverluste bei der Titangewinnung

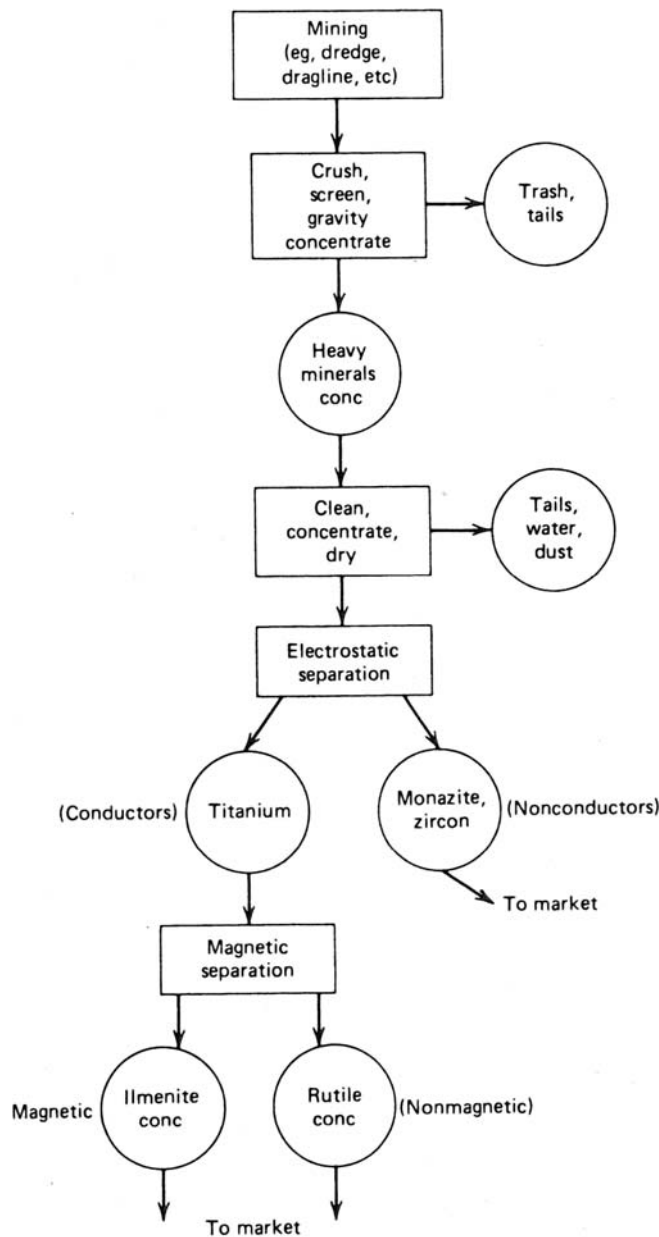
Erztypen (spezifiziert durch Minerale)	Umweltbelastung	Jährliche Materialverluste
Ilmenit-Erze	Landschaftsveränderungen durch Flächeninanspruchnahme (Extraktion, Abfälle), Grundwasserabsenkung Sprenggase	Aufbereitungsverluste
Rutil-Erze	Landschaftsveränderungen durch Flächeninanspruchnahme (Extraktion, Abfälle), Störung von Oberflächengewässern	Aufbereitungsverluste
Seifen	Landschaftsveränderungen durch Flächeninanspruchnahme (Extraktion, Abfälle)	nicht bekannt

VIII.2.2. Aufbereitung

Rohstoffaufbereitung

Die Titanrohstoffe, häufig Sande, durchlaufen einen mehrstufigen Aufbereitungsprozess, bei dem die Rohstoffe gereinigt und Nebenprodukte abgetrennt werden. Dabei kommen unterschiedliche Separationsverfahren wie Dichtesortierung, Magnetsortierung und Elektrosortierung zum Einsatz (Abb. VIII-4) (Gambogi 2009a).

Abb. VIII-4: Aufbereitung von Titansanden



Quelle: Knittel (1997)

Andere Titanrohstoffe werden gebrochen und gemahlen, bevor sie durch Dichtentrennung, Magnetscheidung und eventuell anschließender Flotation aufbereitet werden. Das Erzkonzentrat kann dann durch eine Wäsche mit Säure von Phosphor, Schwefel sowie eventuelle Ölrückstände aus der Flotation befreit werden. In einer weiteren Flotation können Sulfide abgetrennt werden. Das Ilmenitkonzentrat wird in Drehrohröfen bis zu einem Feuchtigkeitsgehalt von 3,5 % getrocknet (Malz 2008).

Nach der Rohstoffaufbereitung enthalten typische Titan-Mineral-Konzentrate ca. 45-70 % Titandioxid bei Ilmenit Rohstoffen und bis über 96 % Titandioxid bei Rutil-Rohstoffen (Knittel 1997).

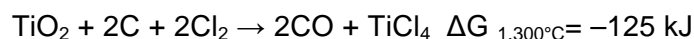
Ein wichtiges Nebenprodukt der Förderung von Titansanden sind Zirkonium-Rohstoffe (Monazit und Zirkon).

Herstellung von Titan-tetrachlorid

Titan gehört zu den nur schwer gewinnbaren Metallen. Das liegt insbesondere an seinem hohen Schmelzpunkt, seiner Reaktionsfreudigkeit und der hohen thermodynamischen Stabilität von Titandioxid (Nagesh et al. 2008). Daher kann Titan bisher wirtschaftlich nicht direkt aus den Erzen reduziert werden, sondern nur über eine mehrstufige technische Gewinnung. Ausgangsstoff für die beiden technisch umgesetzten Verfahren, Kroll-Verfahren und Hunter-Verfahren, ist Titan(IV)-chlorid (TiCl_4) (Sibum et al. 1999).

Titan(IV)-chlorid wird durch Chlorierung von Titandioxid bei Anwesenheit von Koks hergestellt. Die festen Rohstoffe Titandioxid und Koks werden brikkettiert und in einem Fließbettreaktor bei 925-1.010 °C in einem kontinuierlichen verfahren chloriert (Knittel 1997, Kiefer 1971).

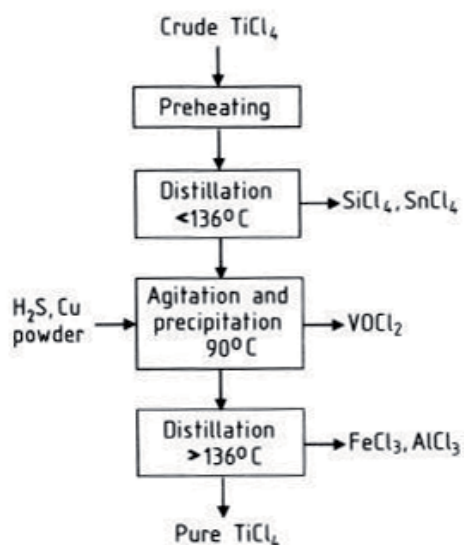
Die Reaktion folgt der folgenden Reaktionsgleichung:



Chlor wird bei der Chlorierung im Überschuss eingesetzt (Kiefer 1971), das flüchtige Titan(IV)-chlorid wird zusammen mit anderen Chloriden gesammelt und durch doppelte Destillation gereinigt. Überschüssiges Chlor wird dabei zurückgeführt.

Vanadium Oxychlorid (VOCl_3), das als Verunreinigung auftritt und einen ähnlichen Siedepunkt wie Titan(IV)-chlorid hat, wird durch Komplexbildung mit Mineralöl, Reduktion mit Schwefelsäure oder Komplexbildung mit Kupfer entfernt (Knittel 1997) (Abb. VIII-5).

Abb. VIII-5: Herstellung von reinem TiCl_4



Quelle: Sibus et al. (1999)

Umweltbelastungen und Materialverluste

Bei der Rohstoffaufbereitung können insbesondere Wasserbelastungen durch Flotationschemikalien, Säuren und mineralische Schwebstoffe auftreten.

Bei der Herstellung des Titantetrachlorids können insbesondere Umweltbelastungen der Luft durch eine mögliche Freisetzung von Chlorgas sowie von Wasser durch Schwefelsäure kommen. Eine Freisetzung von Chlorgas ist jedoch nur im Störfall zu erwarten. Daneben ist der Prozess der Chlorierung mit einem erheblichen Energieverbrauch verbunden.

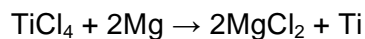
Tab. VIII-3: Umweltbelastung und jährliche Materialverluste bei der Aufbereitung von Titanerzen

Rohstoff	Umweltbelastung	Jährliche Materialverluste
Erzkonzentration	Wasser, durch Säuren und Flotationsmittel Rückstände aus der Aufbereitung	Verluste durch unvollständige Ausbringung, schwankend, ca. 5 %
Erzeugung von TiCl_4	Luft, Cl, CO_2	nicht bekannt
Erzeugung von reinem TiCl_4	Luft, Cl Wasser, durch H_2SO_4	nicht bekannt

VIII.2.3. Verarbeitung

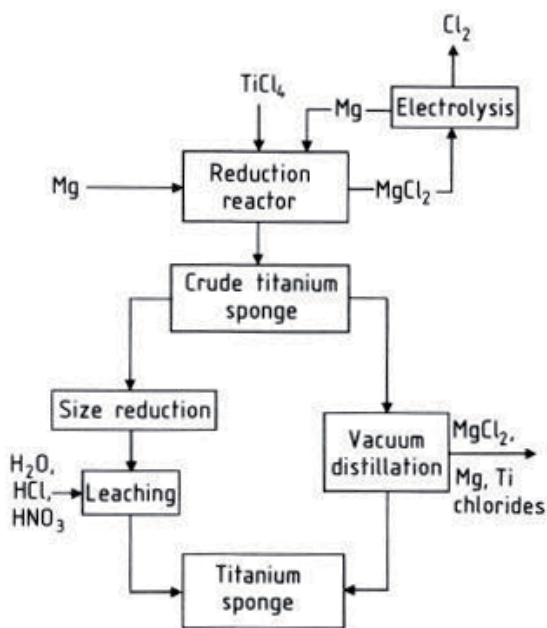
Die Verarbeitung des Titan(IV)-chlorids zu Titan umfasst die Schritte Reduktion, Raffination und Umschmelzen. Zuerst erfolgt die Reduktion des Titan(IV)-chlorids zu Titan, entweder im Hunter-Verfahren mit Natrium oder im heute dominierenden Kroll-Verfahren mit Magnesium. Die beiden Verfahren unterscheiden sich hinsichtlich Kosten, Energieverbrauch und Produktqualität nicht wesentlich.

Im Kroll-Verfahren wird das Titan(IV)-chlorid durch Magnesium gemäß der folgenden Formel reduziert:



Die Herstellung von Titan im Kroll-Verfahren folgt dabei dem folgenden Schema (Abb. VIII-6).

Abb. VIII-6: Kroll-Verfahren



Quelle: Sibum et al. (1999)

Für die Herstellung von 1 kg Titanschwamm werden theoretisch 3,96 kg Titan(IV)-chlorid und 1,015 kg Magnesium benötigt. In der Praxis reagieren jedoch nur ca. 65-70 % des Magnesiums, der Rest verbleibt im Schwamm. Magnesium wird daher im Überschuss eingesetzt.

Zur Herstellung des Titans werden in einem Reaktor aus Eisen bzw. rostfreiem Edelstahl (EC 2001) Magnesium-Barren eingesetzt. Der mit Zu- und Ableitungsrohren versehene Reaktor wird dann dicht verschweißt und in einen Ofen eingesetzt. Vor dem

Aufheizen wird die Atmosphäre im Reaktor durch ein Schutzgas aus Argon oder Helium ersetzt. Nach dem Aufschmelzen des Magnesiums wird flüssiges Titan(IV)-chlorid bei etwa 850 °C dosiert zugesetzt. Nach Beendigung der Titan(IV)-chlorid-Zugabe wird der Reaktor noch für etwa eine Stunde auf ca. 920 °C aufgeheizt um eine vollständige Umsetzung der Reaktion sicherzustellen. Das entstehende Magnesiumchlorid (MgCl_2) wird regelmäßig am Reaktorboden abgelassen. Nach dem vollständigen Erkalten des Reaktionsbehälters wird dieser aufgeschnitten.

Da im Titanschwamm noch Magnesium und Magnesiumchlorid enthalten sind (Magnesium ist mit ca. 10 % Überschuss zugegen), wird er heute in aller Regel destillativ gereinigt. Bei der hierfür eingesetzten Vakuumdestillation wird bei hohem Vakuum und absoluter Trockenheit bei einer Temperatur von ca. 900 °C über ca. 36 Stunden das verbliebene Magnesium und Magnesiumchlorid abdestilliert. Das Titan wird anschließend aus dem Reaktor herausgebrochen oder herausgespant (Abb. VIII-8) (Kiefer 1971). Die Reinheit des Titanschwamms ist in aller Regel für eine technische Verwendung ausreichend.

Alternativ zur Vakuumdestillation kann auch eine halbkontinuierliche Reinigung der Titanspäne in einem Edelgasstrom erfolgen (Kiefer 1971). Daneben gibt es auch die Möglichkeit zur Reinigung mit Salz- oder Salpetersäure. Bei der Laugung mit Säuren geht das noch im Titan vorhandene Magnesium verloren, wohingegen der größte Teil des Magnesiums in der Vakuumdestillation zurückgewonnen werden kann.

Der Energieverbrauch der Titanschwammherstellung und Vakuumdestillation beträgt zusammen 30 kWh/kg Titanschwamm, wobei ca. 75-85 % des Titanschwamms zur Titanherstellung genutzt werden kann. Die Gesamtausbeute an Titan liegt bei ca. 98 % (Sibum et al. 1999).

Das bei der Reduktion des Titan(IV)-chlorids anfallende Magnesiumchlorid wird elektrolytisch zu Magnesium und Chlor reduziert. Das Chlor kann wieder zur Herstellung von Titan(IV)-chlorid genutzt werden. Das Mg wird ebenfalls wiedergewonnen und dient erneut der Reduktion von Titan(IV)-chlorid. Die wesentlichen Hilfsstoffe können so im Kreislauf geführt werden. Der Energieverbrauch hierfür ist jedoch beträchtlich.

Herstellung von Ferrotitan

Ferrotitan wird in Stahllegierungen eingesetzt um die Zugfestigkeit und Zähigkeit zu erhöhen. In rostfreiem Edelstahl wird Ferrotitan eingesetzt um Schwefel aus der Schmelze zu entfernen.

Ferrotitan wird aus titanhaltigen Mineralien wie etwa Ilmenit und aus Titanschrott hergestellt. Die Herstellung von Ferrotitan erfolgt in metallothermischen Prozessen. Carbothermische Prozesse erzeugen Produkte mit zu hohem Kohlenstoffgehalt für die Verwendung in der Stahlindustrie.

Aufgrund einer besseren Verfügbarkeit von Titanschrotten erfolgt die Herstellung von Ferrotitan zunehmend aus Schrotten. Bei der Herstellung aus Schrotten werden Titanschrotte und Eisen- bzw. Stahlschrotte elektrisch induktiv erschmolzen (EC 2009).

Umschmelzen von Titan

Der Titanschwamm wird durch Umschmelzen in kompakte Vorprodukte (Ingots) überführt. Hierzu werden Vakuum-Lichtbogenöfen eingesetzt. Der Titanschwamm wird zunächst hydraulisch zu Blöcken verpresst und zu großen Elektroden verschweißt. Hierbei können auch Schrotte eingesetzt werden (Sibum et al. 1999). Danach wird die Elektrode unter Vakuum geschmolzen. Als Ergebnis des Umschmelzens entstehen Blöcke mit bis zu 10 t Gewicht für die Weiterverarbeitung.

Neben der Möglichkeit Titanschwamm im Vakuum-Lichtbogenofen umzuschmelzen, kann Titanschwamm oder Titanschrott direkt, z.B. in Induktionsöfen, eingeschmolzen werden (Tsykulenko 2007a).

Der Energieverbrauch der verschiedenen Umschmelzverfahren unterscheidet sich stark. Beim Umschmelzen unter Vakuum im Lichtbogen ist der Energieverbrauch mit ca. 1 kWh/kg Titan am geringsten. Mit ca. 4 kWh/kg Titan ist der Energieverbrauch beim Umschmelzen im Induktionsofen am höchsten (Tsykulenko 2007b). Typisch beim Umschmelzen ist ein Energieverbrauch von ca. 1 kWh/kg Titan (Sibum et al. 1999).

Problematisch beim Umschmelzen von Titan ist, dass es bei hohen Temperaturen, d. h. nicht nur im geschmolzenen Zustand, mit allen Feuerfest-Werkstoffen einschließlich oxidischer Werkstoffe reagiert. Titan muss bei hohen Temperaturen daher unter Vakuum oder Schutzgas behandelt werden (Tsykulenko 2007a).

Tab. VIII-4: Umweltbelastungen und jährliche Materialverluste bei der Verarbeitung von Titan

Halbzeug	Umweltbelastung	Jährliche Materialverluste	Bemerkungen
Titan(-schwamm) nach Vakuumdestillation	nicht bekannt	nicht bekannt	sehr hoher Energieverbrauch
Titan(-schwamm) nach Laugung	nicht bekannt	Mg, ca. 25-30 %	heute nicht mehr gebräuchlich

VIII.2.4. Produktion von Titanprodukten

Aus Titan werden mit verschiedenen Verfahren Vorprodukte bzw. Produkte hergestellt. Aus den Ingots können durch Warmwalzen und Schmieden Vorprodukte (Bleche, Drähte) und Produkte hergestellt werden.

Durch Warmformung werden Schmiedeteile und dickere Bleche hergestellt, durch Kaltformung Drähte, dünne Bleche und Folien. Titan muss insbesondere für höhere Festigkeiten nach der Umformung zur Entspannung wärmebehandelt werden.

Nach einer warmen Umformung müssen die Titanprodukte gebeizt werden, um oberflächliche Oxydschichten zu entfernen, die bei einer weiteren Verarbeitung stören würden. Hierbei werden 20- bis 40-prozentige Salpetersäure (HNO_3), ein- bis dreiprozentige Flußsäure (HF) oder Natriumhydroxid-Salzbäder mit Zusatz von Natriumnitrat oder Borax bei Temperaturen von 450-510 °C eingesetzt.

Bei der Bearbeitung von Vorprodukten aus Titan kommen spanende und nicht spanende Verfahren zum Einsatz.

Titan kann tiefgezogen werden. Beim Pressen und Stanzen verhält sich Titan ähnlich wie Stahl. Um Brüche zu vermeiden müssen die Biegeradien groß und die Verformungsgeschwindigkeit gering sein (Sibum et al. 1999)

Mit Niob legiertes Titan mit zweiphasiger Mikrostruktur kann auch superplastisch geformt werden. Hierbei sind plastische Verformung mit Längenänderungen bis zu 1.000 % möglich.

Beim Fügen kann Schutzgasschweißen angewendet werden. Lötverbindungen sind nur möglich, wenn zuvor eine lötbare Beschichtung aufgebracht wurde. Löten sollte unter Vakuum oder Schutzgas erfolgen, um ein Eindiffundieren atmosphärischer Gase in das Metall zu verhindern. Auch Klebeverbindungen sind möglich.

Umweltbelastung und Materialverluste

Bei der Verarbeitung von Titan kommt es verfahrensabhängig zu Materialverlusten. Größere Verluste treten vor allem bei spanenden Verfahren auf. Bei diesen Verfahren ist aufgrund der großen Zerspanungsarbeit auch von einem besonders hohen Energieverbrauch auszugehen. Daneben besteht die Gefahr, dass bei zu hohen Schnitt-/Spangeschwindigkeiten die entstehenden Späne oxidieren und nicht mehr recycelt werden könnten.

Bei anderen Verfahren sind die Materialverluste in der Regel geringer.

Grundsätzlich hängen die Materialverluste vom jeweiligen Produkt ab und können nicht pauschal angegeben werden. Reste (Stanzreste, Späne etc.) können jedoch in aller Regel gut recycelt werden.

Tab. VIII-5: Umweltbelastung und jährliche Materialverluste bei der Produktion von Titanprodukten

Bearbeitung	Produkt	Umweltbelastung	Jährliche Materialverluste
Warmumformung	Schmiedeteile	nicht bekannt	
	Bleche	nicht bekannt	Enden und Ränder, Mengen unbekannt
	Wärmebehandlung	nicht bekannt	
Kaltumformung	Bleche, Drähte, Folien	nicht bekannt	Enden und Ränder, Mengen unbekannt
Spanende Bearbeitung		Wasserbelastung durch Kühlschmiermittel	Späne, wechselnde Mengen, können oxydieren
Fügen	Schweißkonstruktionen	nicht bekannt	nicht bekannt

VIII.2.5. Nutzung

Titan ist bei den üblichen Einsatzbedingungen sehr stabil und zeigt dort keine relevanten Verluste. Die Lebensdauer der meisten Titanprodukte, insbesondere beim Einsatz in Luftfahrzeugen, ist relativ lang und kann 30 oder mehr Jahre erreichen.

Umweltbelastungen in der Nutzungsphase der Produkte sind nicht durch Titan bedingt (sondern durch die generelle Anwendung der Produkte wie z.B. Luftfahrzeuge).

VIII.2.6. Recycling

Titan kann einfach rezykliert werden, solange es in metallischer Form vorliegt. Titanschrotte können beim Umschmelzen anstelle von Titanschwamm eingesetzt werden.

Recycling von Titan ist lange etabliert. Sekundärtitan macht einen beträchtlichen Teil an der gesamten Titanproduktion aus. In den Vereinigten Staaten wurden im Jahr 2007 33.700 t Titanschwamm und 23.800 t Titanschrott eingesetzt (USGS 2008b); der Schrottanteil am gesamten Input der Titanproduktion betrug damit 41 %.

Umweltbelastung und Materialverluste

Das Recycling von Titan ist mit einem erheblichen Energieverbrauch verbunden.

Tab. VIII-6: Umweltbelastungen und jährliche Materialverluste beim Recycling von Titan

Rezyklierter Stoffstrom	Umweltbelastung	Jährliche Materialverluste	Bemerkungen
Neuschrott	nicht bekannt	nur geringe Verluste	hoher Energieverbrauch
Altschrott	nicht bekannt	nur geringe Verluste	hoher Energieverbrauch
Titan als Legierungselement	nicht bekannt		hoher Energieverbrauch

VIII.2.7. Titan in die Deponien

Das metallische Titan wird überwiegend recycelt, nur geringe Mengen davon gelangen in die Deponien. Die genauen Mengenströme sind jedoch nicht bekannt. Titan wird von Flusssäure und heißen Säuren angegriffen. Unter den Bedingungen einer Deponie ist es weitgehend inert. Umweltbelastungen sind nicht bekannt.

Titandioxid kann mit einer Reihe von Stoffen in die Deponien eingetragen werden, es ist jedoch inert und stellt keine Umweltgefährdung dar. Die jährlichen Frachten, die in die Deponien gelangen, sind unbekannt, können jedoch beträchtlich sein.

VIII.2.8. Titan in die Umwelt und andere Senken

Für metallisches Titan überwiegt die nicht-dissipative Verwendung. Der größte Teil des Titans wird wiederverwendet. Aufgrund schlechter Datenlage ist eine Abschätzung für die jährlich freigesetzten Mengen Titan nicht möglich. Unabhängig davon gilt Titan als nichttoxisch und als nicht essenzielles Spurenelement. Die Freisetzung von Titan ist daher unkritisch.

Titandioxid kommt in der Natur in zahlreichen Gesteinen und Böden vor. Der umfangreiche Einsatz von Titandioxid hat zur Folge, dass vermutlich beachtliche Mengen freigesetzt werden und in die Umwelt gelangen. Trotzdem ist eine Umweltgefährdung durch die Freisetzung von Titandioxid unwahrscheinlich.

VIII.3. Fazit

VIII.3.1. Verbesserungspotential

Der größte Teil des Titans wird als Farbpigment in Form von Titandioxid eingesetzt. Dementsprechend ist auch ein Großteil der Umweltbelastung bei der Gewinnung und Aufbereitung von Titanerzen mit der Herstellung von Titandioxid verknüpft und nur ein kleiner Teil (ca. 5 %) mit der Herstellung von metallischem Titan.

Schwerpunkt dieser Untersuchung ist metallisches Titan, daher wurde keine detaillierte Untersuchung hinsichtlich von Verbesserungspotentialen im Lebenszyklus von Titandioxid durchgeführt. Offensichtlich wird Titandioxid jedoch in vielen Produkten wie Anstrichen oder Lacken dissipativ eingesetzt, was die Wiedergewinnung stark oder ganz eingeschränkt. Das bedeutet, dass die in diesen Verwendungen eingesetzte Titanmenge stetig neu aus dem Bergbau gewonnen und anschließend raffiniert werden muss.

Die Gewinnung von Titanerzen bedingt teils eine erhebliche Zerstörung der Landschaft, insbesondere bei Seifenlagerstätten. Die pro Tonne Titan aufgewendeten Materialmengen sind erheblich, was durch einen mittelgroßen TMR dokumentiert ist (ca. 100 t/t Titan).

Bei metallischem Titan gibt es aufgrund der sehr aufwendigen und teuren Herstellung (Tsykulenko 2007c) zahlreiche Bemühungen, die Herstellung effizienter und kostengünstiger zu gestalten. Eine direkte Elektrolyse von Titandioxid hat den Nachteil einer geringen Effizienz und sehr langer Elektrolysezeiten. Sie ist daher keine vorteilhafte Alternative zu den bisherigen Verfahren (Jiao 2006). Eine Alternative könnte die Elektrolyse von Titanoxid zusammen mit Titancarbid in Natriumchlorid-Kaliumchlorid sein. Titanoxid und Titancarbid lassen sich durch Reduktion von Titandioxid bei Temperaturen von 1.400 °C und Normaldruck oder bei 1.000 °C und Vakuum erzeugen. Dieses Verfahren soll deutlich kostengünstiger als das Kroll-Verfahren sein und Produktionskosten etwa auf dem Niveau von Aluminium bei gleichzeitig geringerem Energieverbrauch in der Elektrolyse ermöglichen (Jiao 2006, Tsykulenko 2007c). Bisher erfolgte jedoch noch keine technische Umsetzung dieses Verfahrens.

Auch die calciothermische Reduktion (Reduktion durch Calcium) von Titandioxid wird diskutiert (Jacob / Gupta 2009). Eine kommerzielle Umsetzung soll in Japan erfolgen (Nagesh et al. 2008). Es wird jedoch davon ausgegangen, dass dieser Prozess das bisher dominierende Kroll-Verfahren nicht kurzfristig ablösen kann, da zunächst längere Studien und Entwicklungsarbeiten durchgeführt werden müssen (Suzuki 2007).

Entwicklungsversuche in den Vereinigten Staaten während der Siebzigerjahre und Achtzigerjahre des 20. Jahrhunderts zur elektrolytischen Erzeugung von Titan aus Titan(IV)-chlorid waren nicht erfolgreich; eine Umsetzung im industriellen Maßstab ist nie erfolgt (Nagesh et al. 2008).

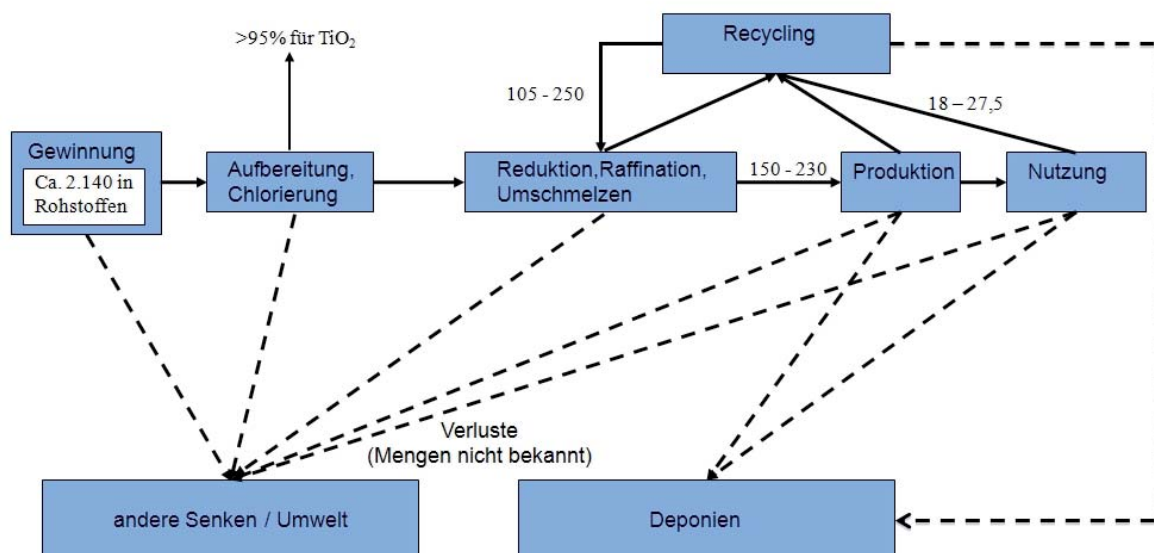
Im Cambridge Prozess erfolgt eine "electro de-oxygenation" von Titandioxid in geschmolzenem Calciumchlorid. Der Prozess wird derzeit in einer Pilotanlage an der Universität Berkeley, Kalifornien, Vereinigte Staaten, mit einer Tagesproduktion von 22 kg Titan eingesetzt (Nagesh et al. 2008, Tsykulenko 2007c).

Der Armstrong-Prozess basiert auf den Hunter-Prozess (Reduktion von Titan(IV)-chlorid durch Natrium), erfolgt jedoch kontinuierlich. Im Gegensatz zum Hunter-Prozess (und Kroll-Prozess) wird kein Titanschwamm, sondern Titanpulver hergestellt. Eine 300 t/a-Anlage soll in den Vereinigten Staaten mit diesem Prozess kommerziell betrieben werden. Ökonomische oder ökologische Kennzahlen sind jedoch nicht verfügbar.

Daneben werden weltweit weitere alternative Prozesse zur Titanherstellung untersucht (Nagesh et al. 2008, Froes et al. 2006). Diese Verfahren sind jedoch noch in einem frühen Stadium und in aller Regel nur schlecht beschrieben. Eine Einschätzung der Umsetzbarkeit und des mit ihnen verbunden Verbesserungspotenzials sind daher hier nicht möglich.

Es wird davon ausgegangen, dass innerhalb der nächsten fünf Jahre eines der genannten Verfahren zur kostengünstigeren Produktion von Titan industriell umgesetzt wird (Gambogi 2009a).

Abb. VIII-9: Jährliche weltweite Titanmetall-Flüsse bei der Gewinnung und Nutzung von Titan. Angaben in tausend Tonnen. Der Pfeil aus der Aufbereitung nach oben zeigt die Abtrennung des Stoffflusses Titandioxid (im Weiteren hier nicht abgebildet) vom metallischen Stofffluss (hier abgebildet) an.



VIII.3.2. Methodische Schwierigkeiten

Relevante Datenlücken

- Die statistischen Daten zu Titan sind unvollständig, insbesondere hinsichtlich der weltweiten jährlichen Produktionsmengen. Für die Vereinigten Staaten wird beim U. S. Geological Survey die Produktion nicht berichtet.
- Da Titan intensiv in der Luftfahrt eingesetzt wird, insbesondere auch der militärischen Luftfahrt, ist davon auszugehen, dass berichtete Produktionsmengen mit erheblichen Unsicherheiten behaftet sind.
- Die Angaben zu Materialverlusten und Umweltbelastungen sind unvollständig.

VIII.4. Referenzen

- AGS [Ausschuss für Gefahrstoffe] (2009): Technische Regeln für Gefahrstoffe: Arbeitsplatzgrenzwerte TRGS 900 (Ausgabe: Januar 2006, zuletzt geändert und ergänzt: GMBI Nr. 28, 605) (02.07.2009)
- EC [European Commission] (2001): Reference Document on Best Available Techniques in the Non Ferrous Metal Industries. Integrated Pollution Prevention and Control (IPPC). Zusammenfassung in deutscher Übersetzung (December 2001)
- EC [European Commission] (2009): Draft Reference Document on Best Available Techniques in the Non Ferrous Metal Industries. Integrated Pollution Prevention and Control (IPPC)
- Froes, F. H. / Gungor, M. N. / Ashraf, M. (2006): Cost Affordable Titanium – An Update; *Materials Technology*, Vol. 21, Nr. 4, 206-209
- Gambogi, J. (1996-2009): Mineral Commodity Summaries: Titanium and Titanium Dioxide. U. S. Geological Survey
- Gambogi, J. (2009a): Minerals Yearbook 2007: Titanium [Advance Release]. U. S. Geological Survey
- Gambogi, J. (2009b): Mineral Commodity Summaries: Titanium Mineral Concentrates. U. S. Geological Survey; 174-175
- Jacob, K. T. / Gupta, S. (2009): Calciothermic Reduction of TiO_2 : A Diagrammatic Assessment of the Thermodynamic Limit of Deoxidation; *JOM*, Vol. 61, Nr. 5, 56-59
- Jiao, S./ Zhu, H (2006): Novel metallurgical process for titanium production
- Kiefer, R./ Jangg, G. / Ettmayer, P. (1971): Sondermetalle. Metallurgie, Herstellung, Anwendung; Wien: Springer-Verlag
- Knittel, D. (1997): Titanium and Titanium Alloys; in: Kirk-Othmer Encyclopedia of Chemical Technology, Vol. 23
- Malz, N. (2008): Die Ilmenit-Lagerstätte Tellnes (Norwegen); <http://www.geoberg.de/text/geology/08021101.php> (14.01.2010)
- Nagesh, C. / Ramachandran, C. S. / Subramanyam, R. B. (2008): Methods of Titanium Sponge Production; *Transactions of the Indian Institute of Metals*, Vol. 61, Nr. 5, 341-348
- Pohl, W. L. (2005): Mineralische und Energie-Rohstoffe, 5. Auflage; Stuttgart
- Sibum, H. / Güther, V. / Roidl, O. / Habashi, F. / Wolf, H. U. (1999): Titanium, Titanium Alloys, and Titanium Compounds (revised 1999); in: Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry (2009), 7th edition, electronic Version

- Suzuki, R. O. (2007): Direct reduction processes for titanium oxide in molten salt; JOM, Vol. 59, Nr. 1, 68-71
- Tsykulenko, K. A. (2007a): Titanium – Problems of Production, Part 2; *Advances in Electrometallurgy*, Vol. 2, 39-47
- Tsykulenko, K. A. (2007b): Titanium – Problems of Production, Part 3; *Advances in Electrometallurgy*, Vol. 3, 34-41
- Tsykulenko, K. A. (2007c): Titanium – Problems of Production, Part 1; *Advances in Electrometallurgy*, Vol. 1, 28-34
- USGS [U. S. Geological Survey] (2008a): Titanium Dioxide Pigment Statistics (last modification: 26.11.2008)
- USGS [U. S. Geological Survey] (2008b): Titanium Sponge Statistics (last modification: 26.11.2008)

IX. Zink

Christoph Lauwigi und Christoph Dressler,
Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg

IX.1. Einleitung

IX.1.1. Relevanz

Zink weist eine hohe Umweltrelevanz auf. Zudem hat es ein hohes Potential zur Nutzung in innovativen Anwendungen (Akkumulatoren).

Zink ist als Spurenelement für Menschen, Tiere und Pflanzen essenziell. Es hat eine große technische Bedeutung aufgrund seiner physikalischen und chemischen Eigenschaften, welche in zahlreichen Bereichen des täglichen Lebens Verwendung finden. Daneben weist es aufgrund seiner metallurgischen Besonderheiten wie dem vergleichsweise niedrigen Siedepunkt von 906 °C eine vielfältige Verwendung in der Metall verarbeitenden Industrie auf.

IX.1.2. Charakteristika

Zink ist ein bläulich-weißes, unedles und bei Zimmertemperatur sprödes Metall, das zu den Übergangsmetallen gehört. In seinen Eigenschaften ähnelt es den Erdalkalimetallen. Die Häufigkeit von Zink in der Erdkruste beträgt durchschnittlich 0,0065 % und ist damit vergleichbar häufig wie Nickel oder Kupfer. Im Gegensatz zu Kupfer kommt Zink allerdings nicht gediegen vor. Lagerstätten zur Zinkgewinnung finden sich in Kanada, Irland, Schweden, Jugoslawien, Australien, Kasachstan, Usbekistan und Kirgisistan (Graf 2005). Der TMR (Globaler Materialaufwand, engl.: *Total Material Requirement*) von Zink beträgt ca. 22 t/t Zink (Wuppertal Institut 2003).

Metallisches Zink ist ein relativ ungefährlicher Stoff. Jedoch ist Zink trotzdem mit Vorsicht zu handhaben, da es in nicht stabilisierter Form mit Wasser unter Bildung leicht entzündlicher Gase reagiert, bei Erreichen der Zündtemperatur an der Luft selbstentzündlich ist und auf Wasserorganismen stark toxisch wirkt.

IX.1.3. Anwendungsbereiche

Zink findet in der Metall verarbeitenden Industrie und der chemischen Industrie Anwendung. Wichtige Einsatzbereiche sind Korrosionsschutz (Verzinkung), als Legierungsmetall für z.B. Messing und Rotguss, Zinklegierungen und zinkhaltige Verbindungen zur Halbzeugproduktion sowie sonstige Anwendungen (Classen / Scharnhorst 2007). Daneben wird Zink aufgrund der antibakteriellen Eigenschaften seines Oxides in der Lüftungs- und Klimatechnik, in der Versorgungstechnik und bei medizinischen Behandlungen eingesetzt. Die verschiedenen Zinkprodukte werden in zahlreichen Endprodukten eingesetzt, unter anderem im Bauwesen, in Transport und Verkehr, in der Elektro- und Elektronikindustrie und im Maschinenbau. Weitere Angaben zur Verteilung des Zinks auf verschiedene Anwendungsbereiche finden sich in Kap. IX.2.4.

IX.2. Umweltbelastungen und Materialverluste

IX.2.1. Abbau

Zink wird größtenteils im Untertagebau abgebaut, nur etwa 10 % der Weltzinkproduktion stammen aus dem Tagebau. Nach Krüger (2001) ist Zinkblende (ZnS) das bedeutendste Zinkmineral mit einem Zinkgehalt von ca. 67 %. Darüber hinaus ist Smithsonit (ZnCO_3 , alt: Zinkspat) mit einem Zinkgehalt von ca. 65 % von Bedeutung.

Die Zinkkonzentrationen in den Roherzen betragen zwischen 3 % und 8 %. Die Gewinnung ist überwiegend mit derjenigen anderer wirtschaftlich bedeutender Metalle (Blei, Kupfer, Silber u. a.) verbunden. So treten Zink und Blei wegen ihres ähnlichen geochemischen Verhaltens fast immer vergesellschaftet auf; der Metallgehalt an Zink, Blei und Kupfer beträgt in diesen geförderten Erzen kumuliert 5-25 %. Daneben kommen isomorphe Anteile an Eisen (bis 25 %), Mangan (bis 5 %) und Cadmium (0,1-0,4 %) sowie je nach Lage und Art der Lagerstätte weitere Spuren- und Nebenmetalle vor.

90 % des Zinks werden als Hauptprodukt gewonnen, also aus Lagerstätten, die wirtschaftlich hauptsächlich auf den Zinkabbau ausgerichtet sind (Zinkerze) (Krüger 2001); der Rest wird als Nebenprodukt aus zinkführenden Erzen gewonnen. Laut Tolcin (2009) wurden im Jahr 2009 10,9 Mt Zink gewonnen.

Umweltbelastungen und Materialverluste

Beim Abbau der Zinkerze und zinkführenden Erze im Tagebau können tiefgreifende Landschaftsveränderungen auftreten. Die Tagebaugruben reichen häufig bis unterhalb des Grundwasserniveaus. Um den Abbau der Erze zu ermöglichen, muss daher der Abbaubereich kontinuierlich entwässert werden. Dies hat eine Absenkung des Grundwassers zur Folge, welche die umliegenden Landschaften und die darin beheimateten Ökosysteme beeinflusst. Im Vergleich zur Gewinnung von Zinn ist der Flächenverbrauch deutlich geringer. Eine Übersicht ausgewählter Umweltbelastungen sowohl des Abbaus und der Aufbereitung von Zinkerzen, als auch der anschließenden Gewinnung von Zink lässt sich den Umweltprofilen von Giegrich und Liebich (2008) entnehmen. Um die Vergleichbarkeit mit anderen untersuchten Metallen zu gewährleisten und einen Fokus auf zu erwartende Kernprobleme zu lenken, wird hier die Darstellung beschränkt auf den Treibhauseffekt, die Versauerung, die terrestrische Eutrophierung, den Flächenverbrauch und den kumulierten Rohstoffaufwand (KRA); für quantitative Angaben siehe Tab. IX-1.

Tab. IX-1: Umweltbelastungen und jährliche Materialverluste bei Abbaus und Aufbereitung von Zinkerzen

Prozesse	Umweltbelastung	Jährliche Materialverluste
Gewinnung und Aufbereitung (Durchschnittswerte nach Classen und Schamhorst (2007))	Treibhauseffekt: 426 kg CO ₂ -Äq./t Versauerung: 6,93 kg SO ₂ -Äq./t Terrestrische Eutrophierung: 1,04 kg PO ₄ -Äq./t Kumulierter Rohstoffaufwand: 11 t/t Flächenverbrauch: 0,739 m ² /t	1,6 Mt
Aufbereitung	Schwermetallstäube	

IX.2.2. Aufbereitung

Um für die weitere Verarbeitung ein geeignetes Konzentrat zu erhalten, wird Zinkerz mittels Flotationsverfahren¹ aufbereitet. Dadurch wird das taube Gestein von den zinkführenden Mineralien getrennt. Der Zinkgehalt der Konzentrate, die man durch Flotation erhält, liegt nach Krüger (2001) im Bereich von 45-60 %, nach Classen und Schamhorst (2007) bei ca. 50 %.

Umweltbelastungen und Materialverluste

Auf Basis publizierter Gewinnungsraten verschiedener Abbau- und Aufbereitungsverfahren ist von Zinkverlusten in Höhe von 15 % auszugehen (Classen / Schamhorst 2007). Hochgerechnet auf die Weltproduktion entspricht dies jährlich einem Zinkverlust von 1,6 Mt.

Da es sich bei der Flotation um ein überwiegend physikalisches Trennungsverfahren handelt, entstehen durch diese Aufbereitung in der Regel nur geringe Umweltbelastungen – abgesehen von den Flotationschemikalien, möglichen Schwermetallimmissionen ins Wasser und dem erforderlichen Energieaufwand.

¹ Es handelt sich um ein physikalisches Trennungsverfahren zur Trennung feinkörniger Gemenge. Flotation findet in einer wässrigen Suspension statt, in welche Luftblasen eingebracht werden. Durch Flotationsmittel erhält man eine hydrophobe und eine hydrophile Komponente. Die hydrophoben Partikel haften an den Luftblasen und steigen nach oben auf, wo sie in Form eines Schaums vom Rest abgetrennt werden können.

Eine Aufschlüsselung der Umweltbelastungen und Materialverluste nach unterschiedlichen Erztypen bzw. Hauptmineralien war aufgrund fehlender Daten nicht möglich; die Angaben in Tab. IX-1 beziehen sich daher auf eine Abschätzung der durchschnittlichen Umweltbelastungen (ProBas 2010).

IX.2.3. Verarbeitung von Zinkerzkonzentraten und Produktion von Zinkprodukten

Im Wesentlichen können die Zinkerzkonzentrate auf zwei Arten zu Zink verarbeitet werden, nämlich mittels pyrometallurgischem und mittels hydrometallurgischem Verfahren. In beiden Verfahren wird Zinkoxid (ZnO) verarbeitet. Da jedoch das Zink in den Zinkerzkonzentraten überwiegend in Form von Zinkblende (ZnS) vorliegt (vgl. Kap. IX.1.2), werden diese vorab geröstet. Bei diesem Vorgang wird Schwefeldioxid (SO_2) emittiert, welches je nach Stand der Abgasreinigung aufgefangen und zu Schwefelsäure weiterverarbeitet wird (Nebenprodukt) oder aber unbehandelt in die Umwelt gelangt. Der Stand der Abgasreinigung entspricht allerdings in den bedeutendsten zinkproduzierenden Ländern (vgl. Kap. IX.1.2) nicht dem Stand der Technik, weswegen hier von relevanten Emissionen auszugehen ist.

Die Pyrometallurgie (Erzaufbereitung und Metallgewinnung durch Hitze, d. b. Schmelzen, Rösten, Kalzinieren, Destillieren, Seigern) wird in der Europäischen Union für einfache Zinkkonzentrate aus technischen Gründen nicht mehr verwendet und hat auch weltweit an Bedeutung verloren². Lediglich der sogenannte Imperial-Smelting-Prozess ist nach wie vor von Bedeutung aufgrund seiner Fähigkeit, komplexe Blei-Zink-Konzentrate und Sekundärstoffe derart zu verarbeiten, dass als Produkte marktfähiges Blei und Zink entstehen. Nach Graf (2005) beträgt der Anteil der pyrometallurgischen Verfahren an der weltweiten Produktion ca. 20 %.

Die Hydrometallurgie (Vorbereitung von Erzen zur Verhüttung durch kalte und warme Trennverfahren in wässrigen Lösungen) kommt bei Zinksulfiden und -oxiden sowie bei Karbonat- oder Silikatkonzentraten zum Einsatz. Ihr Anteil beträgt ca. 80 % an der weltweiten Produktion. Hierbei erfolgt die Herstellung des Metalls über die Reaktion des gerösteten oxidischen Zinkerzkonzentrates zu Zinksulfat durch Zugabe von Schwefelsäure. Auf elektrolytischem Weg wird das Zink reduziert. Das abgeschiedene Elektrolysezink hat einen wesentlich höheren Reinheitsgrad als Hütten- oder Rohzink, daher sind hier keine weiteren Raffinationsschritte notwendig.

Entsprechend den Zinkflüssen aus der Aufbereitung und dem Recycling in den Prozess Produktion beträgt der gesamte Zinkinput in die Produktion 12,8 Mt.

² Pyrometallurgische Methoden erfordern einen zusätzlichen Arbeitsschritt für die Destillation, um hochkonzentriertes Zink zu erhalten. Außerdem ist die Effizienz der Zinkextraktion vergleichsweise niedrig und der Energieaufwand höher als bei hydrometallurgischen Produktionsmethoden (Graf 2005).

Umweltbelastungen und Materialverluste

Informationen über die Umweltbelastungen hinsichtlich der Produktion von Zink sind beispielsweise in den sogenannten Umweltprofilen zu finden (ProBas 2010). Da sich die Angaben im dort dargestellten Umweltprofil auf den gesamten Lebensweg beziehen, wurde der Anteil Umweltbelastungen entlang des Lebensweges bis zur Aufbereitung der Zinkerze (inklusive) abgezogen (d. b. die Werte in Tab. IX-1 abgezogen). Die Differenzbeträge, die die Produktion von Zink beschreiben, sind in Tab. dargestellt. Zur Gewährleistung der Vergleichbarkeit zwischen den Ergebnissen der einzelnen Metalle wird die Betrachtung der Daten auf die bereits erwähnten Größen beschränkt. Nach Krüger (2001) werden bei der Zinkelektrolyse pro Tonne Zink 2,87 t Kohlendioxid (CO₂) freigesetzt. Dieser Wert liegt oberhalb dem in Tab. IX-2 dargestellten Wert, was durch unterschiedliche Annahmen bzgl. Energiebereitstellung für diesen Prozess begründet werden kann. Als Zinkverluste geben Gordon et al. (2003) einen Wert von 7 % des produzierten Zinks an, was bezogen auf die in Kap. IX.2.3 errechnete Produktion in Höhe von 12,8 Mt Zink einen Zinkverlust von 900.000 t bedeutet (Bezugsjahr 2007). Dieser Wert beruht auf Schlackenuntersuchungen amerikanischer Zinkproduzenten im Zeitraum 1950-1990 und wird weiterhin als gültig erachtet, da das Verhältnis „Zink in Metall“ : „Zink in Schlacke“ sich seit den 1950er Jahren kaum veränderte (Gordon et al. 2003).

Tab. IX-2: Umweltbelastungen und jährliche Materialverluste bei der Zinkproduktion.

Produkt	Umweltbelastung	Materialverluste
Herstellung metallisches Zink	Treibhauseffekt: 2.456 kg CO ₂ -Äq./t Versauerung: 29,3 kg SO ₂ -Äq./t Terrestrische Eutrophierung: 0,88 kg PO ₄ -Äq./t Kumulierter Rohstoffaufwand: 5,8 t/t Flächenverbrauch: 0,12 m ² /t	900.000 t
hydrometallurgische Prozesse (Laugen, Elektrolyse)	flüchtige organische Verbindungen (VOC), Säurenebel	

IX.2.4. Nutzung

Im Jahr 2007 gelangten 11,9 Mt Zink aus der Produktion in die Nutzung. Die Verteilung auf die verschiedenen Anwendungsbereiche ist in Tab. IX-3 dargestellt.

Tab. IX-3: Verteilung des weltweiten Einsatzes von Zink im Jahr 2007 auf die verschiedenen Anwendungsbereiche; Bezugsraum: Welt

Anwendungsbereich	Zink [t/a]	Anteil an der Gesamtproduktion [%]
Verzinkung	5,6 Mt	47 %
Messing	2,3 Mt	19 %
Gusslegierungen	1,9 Mt	16 %
Zinkverbindungen	0,8 Mt	7 %
Zinkhalbzeug	0,8 Mt	7 %
Sonstige Zinkprodukte	0,5 Mt	4 %
Total	11,9 Mt	100 %

Quelle: Initiative Zink (2009)

Diese Zinkprodukte werden dementsprechend in diversen Endprodukten eingesetzt. Hauptanwendungsbereiche für diese Endprodukte sind das Bauwesen (5,3 Mt), Transport und Verkehr (3,2 Mt), die Elektro- und Elektronikindustrie (3,0 Mt) und der Maschinenbau (0,4 Mt) (Initiative Zink 2009).

Aufgrund der länderspezifischen Wirtschaftsstrukturen weicht die Verteilung des Einsatzes in Deutschland vom globalen Durchschnitt ab. Im Jahr 2007 wurden in Deutschland 665.000 t Zink verarbeitet, dessen Verteilung auf die verschiedenen Anwendungsbereiche in Tab. IX-4 dargestellt ist.

Tab. IX-4: Verteilung des deutschen Einsatzes von Zink im Jahr 2007 auf die verschiedenen Anwendungsbereiche; Bezugsraum: Deutschland

Anwendungsbereich	Zink [t/a]	Anteil an der Gesamtproduktion [%]
Verzinkung	239.000	36 %
Messing	173.000	26 %
Gusslegierungen	60.000	9 %
Zinkverbindungen	47.000	7 %
Zinkhalbzeug	140.000	21 %
Sonstige Zinkprodukte	7.000	1 %
Total	666.000	100 %

Quelle: Initiative Zink (2009)

Mangels Angaben für die exakten Import- und Exportmengen für das Jahr 2007 wurden für die vorliegende Studie Außenhandelsdaten für 2005 verwendet. Die Zinkimporte Deutschlands betrugen 852.000 t, die Zinkexporte 564.000 t. Diese absoluten Angaben zum deutschen Außenhandel wurden zur Darstellung von Abbildung 2 mit den Angaben zu den Anteilen der diversen Anwendungsbereiche aus Tab. IX-4 kombiniert. Somit weichen die absoluten Mengen der Darstellung in Abb. IX-2 gegenüber den Werten der Tab. IX-4 ab, doch die Relationen bleiben erhalten.

Dissipative Nutzung

Die Nutzung von Zink in Zinkverbindungen wird als dissipative Nutzung angesehen. Dieser Anwendungsbereich setzte im Jahr 2007 weltweit 800.000 t Zink ein. Mangels weiterer Datenquellen zur quantitativen Aufteilung der „Sonstigen Zinkprodukte“ werden diese ebenfalls als dissipativ angesehen. Dieser Anwendungsbereich nutzte im Jahr 2007 weltweit 500.000 t.

Ungefähr ein Drittel des produzierten Zinks wird als Korrosionsschutz von Stahl eingesetzt. Insbesondere im Außenbereich, wo der Einsatz als Korrosionsschutz überwiegend stattfindet, kommt es in der Regel zur Oxidation des Zinks und in der Folge zu dissipativen Abträgen. Aufgrund der Lebensdauer der verzinkten Produkte zwischen 15 Jahren und 100 Jahren wird dieser Anwendungsbereich als Lager angesehen (Wildt 2009). Die Materialverluste dieses Lagers sind in Kapitel IX.2.7 erläutert.

Nicht-dissipative Nutzung

Die nicht-dissipative Nutzung von Zinkprodukten besteht unter anderem aus den Messing- oder Gußlegierungen (weltweit 4,2 Mt, Bezugsjahr 2007). Ebenfalls zur nicht-dissipativen Nutzung gehört der Einsatz von Zink in verschiedenen Batteriesystemen, die in Tab. IX-4 unter dem Anwendungsbereich Zinkverbindungen geführt werden.

Nach Fricke und Lührs (2008) wurden in Deutschland im Jahr 2007 ca. 3.000 t Zink und Zinkverbindungen aus dem Batterierecycling rückgewonnen, was einen Anteil von 6 % der in Tab. IX-4 aufgeführten Zinkverbindungen bedeutet. Allerdings bezieht sich diese Mengenangabe nicht den reinen Zinkgehalt, sondern auf die Gesamtmasse der Zinkverbindungen. Da sich diese Studie auf die Zinkmengen bezieht, werden diese Ergebnisse nicht im Rahmen dieser Studie genutzt.

Umweltbelastungen und Materialverluste

Die Umweltbelastungen durch Zink während der Nutzungsphase sind durch die dissipative Nutzung gegeben. Hierbei gehen 11 % des Gesamteinsatzes von Zink dissipativ als Fluss in die Umwelt/andere Senken verloren (Zinkverbindungen und sonstige Zinkprodukte), was einer Menge von ca. 1,3 Mt Zink entspricht. Eine Beschreibung hierzu findet sich in Kap. IX.2.7.

Zur Abschätzung der Zinkflüsse in Deutschland werden die Mengen aus Tab. IX-6 übernommen. Dabei wird angenommen, dass die nicht dem Recycling zugeführten

Flüsse aus der Nutzung vollständig in die Deponien überführt werden. Man erhält damit einen Fluss von 19.000 t Zink in die Deponien.

Tab. IX-5: Umweltbelastungen und jährliche Materialverluste bei der Nutzung von Zinkprodukten

Produkt	Umweltbelastung	Materialverluste
Nutzung von Zinkprodukten		Welt: 1,3 Mt Deutschland: 19.000 t

IX.2.5. Recycling von Zink

Zink wird auf verschiedene Weise aus Zinkschrotten bzw. zinkführenden Schrotten wiedergewonnen. Den größten Anteil machen die Messingschrotte aus, die durch Umschmelzverfahren dem Kreislauf der Kupferlegierungen erneut zugeführt werden. Hier ist der Anteil des Neuschrottes³, welcher direkt in der Produktion recycelt wird, höher als der Anteil des Altschrottes (Initiative Zink 2009).

Die mineralischen zinkhaltigen Abfälle (Verzinkungsrückstände, Filterstäube aus der Stahlindustrie, Schlacken, Zinkstäube) werden in einem ersten Schritt pelletiert. Anschließend gelangen sie in einen Drehrohrofen, sogenannter Wälzofen, wo das Zink bei ca. 1.200 °C verdampft und zu Wälzoxid (Zinkoxid) oxidiert wird. Dieses wird in den Filteranlagen akkumuliert und findet als Zinkkonzentrat Eingang in die Zinkproduktion (Giegrich et al. 2007). Hinsichtlich des Einsatzes von Energie ist festzustellen, dass zur Rückgewinnung von Zink aus dem Wälzofen ähnlich viel Energie erfordert wie bei der Primärproduktion von Zink (Krüger 2001).

Aufgrund der relativ langen Nutzungsdauer vieler Zinkprodukte im Bereich von 15-100 Jahren ist eine genaue Bestimmung der Rückführungsrate in den Zinkkreislauf aufwendig und eine präzise Abschätzung in dieser Studie nicht möglich. Zinkbleche werden zwar zu über 95 % wiederverwertet, dennoch deckt das rezyklierte Zink heute nur etwa 30 % des Gesamtbedarfs, so dass etwa 70 % (ca. 8,3 Mt) der Produktion auf die Primärproduktion (aus Erzen) angewiesen ist (Initiative Zink 2009).

Im Jahr 2007 gelangten weltweit ca. 11,9 Mt Zink in die Nutzung (Kap. IX.2.4). Nach neueren Informationen werden jährlich ca. 3,5 Mt Zink rezykliert (Initiative Zink 2009).

Spatari et al. (2003) untersuchten den europäischen Zinkkreislauf und ermittelten dabei die Zinkgehalte verschiedener Abfallströme. Zur Ermittlung der Zinkmengen der rezyklierten Stoffströme in Deutschland und der Welt wird die europäische Verteilung des Zinks auf die Abfallströme auf den deutschen bzw. den weltweiten Zinkhaushalt über-

³ Neuschrott ist der während der Produktion anfallende Schrott. Demgegenüber besteht der Altschrott aus den nach ihrer Nutzung rezyklierten Endprodukten.

tragen. Bei der Berechnung der Zinkfrachten in den Recyclingstoffströmen wurden zu dem Annahmen zu den Recyclingraten der Abfallkategorien getroffen (Tab. IX-6). Als Ergebnis erhält man, dass weltweit insgesamt 4,8 Mt Zink in den Recyclingstoffströmen geführt werden, wobei bei einigen Abfallkategorien keine stoffliche Verwertung des Zinks erfolgt. Die Zinkfrachten aus dem Recycling in die Produktion werden durch Multiplikation der Zinkfrachten ins Recycling mit der Recyclingrate ermittelt. Man erhält als Ergebnis eine jährlich Zinkfracht des Recyclingstoffstroms in die Produktion von 3,5 Mt.

Tab. IX-6: Weltweite Zinkfrachten in Abfällen: Verteilung auf Abfallkategorien

Abfallkategorie	Verteilung des Recycling-Inputs (Zinkfrachten) [%]	Zinkfrachten im Recycling-Input [Mt]	Recyclingrate [%]	Zinkfrachten aus Recycling in Produktion [Mt]
Altfahrzeuge	32,1	1,54	90	1,39
Bauabfälle	27,2	1,31	100	1,31
Hausmüll	18,6	0,89	50	0,45
Industrieabfälle	15,8	0,76	40	0,30
Sondermüll	4,3	0,21	0	0,00
Klärschlamm	1,1	0,05	10	0,01
Elektro- und Elektronikschrott	0,9	0,04	80	0,03
Total	100,0	4,8	Ø 73	ca. 3,5

Quelle: Spatari et al. (2003) und eigene Annahmen zu Recyclingraten

Umweltbelastungen und Materialverluste

Für die Sekundärproduktion (Recycling) von Zink aus Zinkschrotten muss nur etwa 5 % der Energie aufgewendet werden, die bei der Primärproduktion (aus Erzen) aufzuwenden ist. Da der Energiebedarf zur Herstellung von Primärzink ca. 90 % der bei der gesamten Zinkproduktion entstehenden Emissionen von Kohlendioxid (CO₂) bedingt, wird das Recycling von Zink aus Zinkschrotten als wesentlich umweltfreundlicher eingeschätzt.

Die Rückgewinnungsrate, das ist das Verhältnis der rezyklierten Zinkmenge (3,5 Mt) zu den Zinkfrachten, die aus der Nutzung in das Recycling gelangen, beträgt durchschnittlich 73 % (Tab. IX-6). Jedoch erlaubt nur ein Teil davon eine stoffliche Rezyklierung des Zinks, weswegen es sich bei der rezyklierten Zinkmenge von 3,5 Mt um eine Obergrenze handelt und ein – hieraus resultierender – minimaler Inputstrom in das Recycling von 4,8 Mt. Somit ergibt sich ein Zinkverlust aus dem Recycling von mindestens 1,3 Mt Zink.

Tab. IX-7: Umweltbelastungen und jährliche Materialverluste beim Recycling von Zinkprodukten und zinkführenden Produkten

Produkt	Umweltbelastung	Materialverluste
Zinkprodukte und zinkführende Produkte		1,3 Mt

IX.2.6. Zink in die Deponien

Durch Zinkverluste im Rahmen des Recyclings werden mindestens 1,3 Mt Zink in die Deponien verbracht. Hierin enthalten sind Zinkfrachten im Klärschlamm, der jedoch teils in der Landwirtschaft ausgebracht wird und damit in die Umwelt. Da der Anteil des Klärschlammes, der in die Landwirtschaft ausgebracht wird, auf globaler Ebene nicht bekannt ist, wird er im Stoffhaushaltssystem Zink vollständig in die Deponien überführt.

In die Deponien in Deutschland werden jährlich 19.000 t Zink verbracht.

IX.2.7. Zink in die Umwelt und andere Senken

Die dissipativen Verluste durch verzinkte Produkte werden für Deutschland durch Extrapolation der Ergebnisse einer österreichischen Studie ermittelt (Rebernig 2007). Messungen ergaben am Beispiel einer Mittelstadt (Villach, Österreich), dass auf jeden Einwohner jährliche Zinkemissionen von etwa 82 g anfallen. Durch Hochrechnung dieser Fracht auf die gesamtdeutsche Bevölkerung erhält man für Deutschland eine dissipative Zinkemission von ca. 6.500 t/a. Die Emissionen stammen sowohl von verzinkten Blechen im Außenbereich wie sie bei Dächern, Treppen und Fensterbrettern eingesetzt werden, als auch von im Automobilbau eingesetzten verzinkten Bauteilen. Die Emissionen gelangen hauptsächlich in die Böden, wobei ungefähr die Hälfte der Bodenimmissionen schließlich in Gewässer gelangt (Rebernig 2007).

Da sich obengenannte Studie auf eine urbane Region bezieht, deren Hochrechnung auf einen Flächenstaat wie Deutschland gewisse Unsicherheiten birgt, wird der jährliche Zinkverlust aus dissipativer Nutzung auf ca. 6.000 t geschätzt. Dies entspricht ungefähr einem Prozent des jährlich in Deutschland verarbeiteten Zinks.

IX.3. Fazit

IX.3.1. Verbesserungspotential

Um die Verbesserungspotentiale der einzelnen Prozesse zu verdeutlichen, wird im Folgenden der Zinkhaushalt hinsichtlich der Umweltbelastungen schrittweise zusammengefasst:

- Der Zinkabbau erfolgt überwiegend im Untertagebau, womit per se diverse nicht zinkspezifische Umweltbelastungen einhergehen, insbesondere eine mögliche Grundwasserabsenkung mit tiefgreifenden Folgen für die umliegenden Landschaften sowie die darin beheimateten Ökosysteme. Dies lässt sich mit den verfügbaren technischen Mitteln und der ökonomischen Ausrichtung der Minen nicht grundlegend ändern; allerdings ist es denkbar, künftig vorrangig Minen zu erschließen, die einen möglichst kleinen spezifischen ökologischen Rucksack beim Abbau aufweisen. Aus dem Umweltprofil „Zinkerze und ihre Konzentrate“ lassen sich außerdem quantitative Angaben ableiten, die als Indikatoren für die während der Zinkgewinnung entstehenden Umweltbelastungen dienen können (Giegrich / Liebich 2008).
- Wesentliche Verluste des Stoffflusssystems Zink entstehen durch den Einsatz des Zinks für den Korrosionsschutz von Eisenblechen und Baustahl, der eine dissipative Nutzung des Zinks darstellt: Die Zinkmenge, die in eine dissipative Nutzung gelangt, beträgt ungefähr ein Drittel der jährlichen Primärproduktion. Die Abschwemmungen der Verzinkung werden über die Abwasserbehandlung in den Klärschlamm verbracht. Durch Ausbringen des Klärschlammes kann mittel- bis langfristig eine Anreicherung von Zink und anderen Metallen in den Böden resultieren. Diese dissipativen Verluste aus dem Baubereich lassen sich möglicherweise durch einen eingeschränkten Einsatz der Verzinkung oder Substitution durch andere korrosionsbeständigere Materialien verringern.

Zur Visualisierung des Stoffhaushaltes von Zink wurden die im Rahmen dieser Studie ermittelten Ergebnisse zu weltweiten Zinkflüssen und -verlusten im Stoffflusssystem Zink abgebildet; in einem separaten Stoffflusssystem wurden analog die Ergebnisse zu den deutschen Zinkflüssen und -verlusten abgebildet (Abb. IX-1 bzw. Abb. IX-2).

Abb. IX-1: Stoffhaushaltssystem Zink; *enthält Klärschlamm, der teils auf landwirtschaftliche Flächen ausgebracht wird; Bezugsraum: Welt; Bezugsjahr: 2007

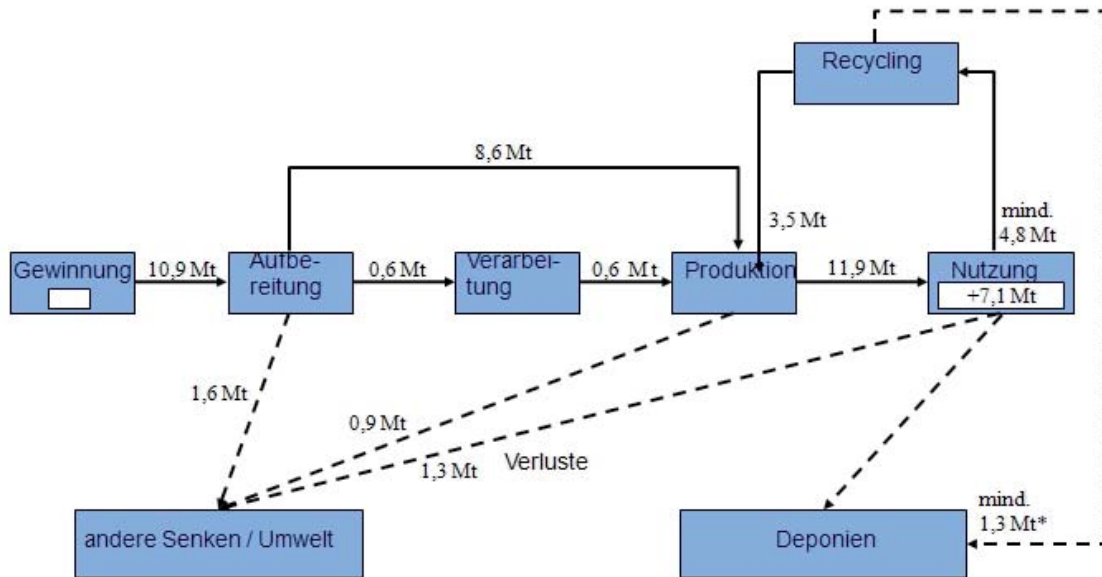
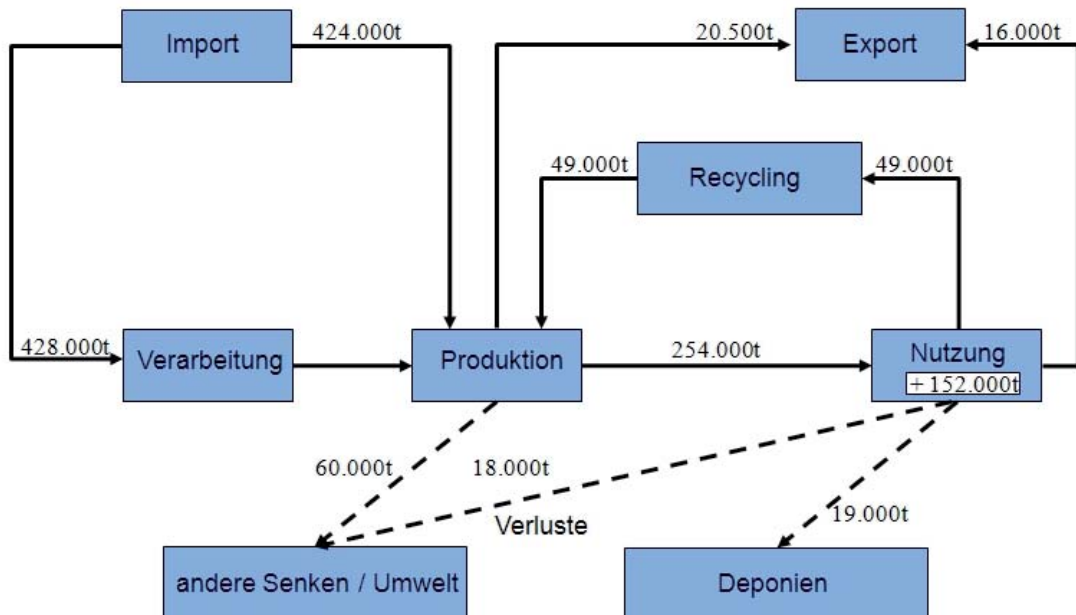


Abb. IX-2: Stoffhaushaltssystem Zink; Bezugsraum: Deutschland; Bezugsjahr: 2005/2007



IX.3.2. Methodische Schwierigkeiten

Relevante Datenlücken

Im Verlauf dieser Studie sind deutliche Datenlücken erkennbar geworden, die in den betroffenen Abschnitten entsprechend gekennzeichnet sind. Hinsichtlich der Umweltbelastungen konnten die Datenlücken teilweise durch begründete Annahmen geschlossen werden. Bezogen auf die verschiedenen Aufbereitungs- und Verarbeitungsprozesse fehlen umweltbezogenen Daten, um einen Vergleich zwischen diesen durchführen zu können.

In einigen Fällen, insbesondere bei der Untersuchung der Materialverluste, waren eine mangelhafte Datenverfügbarkeit und nicht oder nur unzureichend zugängliche firmeninterne Informationen dafür verantwortlich, dass keine quantitativen Abschätzungen durchgeführt werden konnten. Dies ist in den entsprechenden Kapiteln erläutert und wo möglich wurden qualitative Aussagen getroffen.

Generell ist von der Gewinnung hin zur Nutzung hinsichtlich der Qualität und Verlässlichkeit der verfügbaren Daten und Informationen eine Abnahme festzustellen. Mit zunehmendem Verarbeitungsgrad (inklusive Legieren) sind Angaben nurmehr für Produktgruppen oder spezifische Produkte verfügbar, für welche der Zinkgehalt dann abzuschätzen ist, was zusätzliche Ungenauigkeiten bedingt:

- Zu Zinkverlusten bei der Zinkgewinnung waren keine zuverlässigen Angaben verfügbar.
- Der Zinkverlust bei der Zinkproduktion beschränkt sich auf Zinkverunreinigungen in der Schlacke, Stäube und andere während der Verarbeitung bzw. Produktion anfallende Abfallprodukte. Eine Quantifizierung hierzu war im Rahmen dieser Studie nicht möglich.
- Während des Zinkrecyclings treten vor allem die metalltypischen Materialverluste in Form von Schlacken und Stäuben auf. Aufgrund der zahlreichen Nutzungen mit langer Lebensdauer ist es schwierig, präzise Daten zu ermitteln.

Da aufgrund der eingeschränkten Datenverfügbarkeit mehrere Erhebungsjahre herangezogen werden mussten, wird der Zinkhaushalt für einen Zeitraum dargestellt, was bei der Interpretation der Ergebnisse zu berücksichtigen ist.

Neben den direkt bei der Produktion und Nutzung auftretenden Umweltbelastungen zielt eine Gesamtbewertung des Stoffhaushaltes auch auf indirekte Umweltbelastungen: Bei der Zinkproduktion wird teilweise Cadmium mobilisiert. Bis vor einigen Jahren wurde Cadmium als ein wesentliches Nebenprodukt der Zinkproduktion gewonnen, doch aufgrund seiner toxischen Eigenschaften wird es zunehmend seltener in Produkten eingesetzt; dementsprechend nimmt der Umfang der Lagerung von Cadmium in Aufbereitungsrückständen zu. Einen Vorschlag zum Umgang mit Übermengen von

Cadmium macht brachte eine Enquete-Kommission des Deutschen Bundestages bereits Anfang der 1990er Jahre ein, nämlich das nicht mehr genutzte Cadmium unter Tage sicher zu lagern. Die Umweltbelastung durch das unerwünschte Cadmium wurde jedoch im Rahmen dieser Studie nicht untersucht.

IX.4. Referenzen

- Classen, M. / Scharnhorst, W. (2007): Lead, Zinc and the Co-Products Cadmium and Indium; in: Ecoinvent v2.0, Part 10; Dübendorf, Switzerland
- Fricke, J. / Lührs, G. (2008): Jahresbericht/Erfolgskontrolle 2007. Stiftung gemeinsames Rücknahmesystem Batterien; Hamburg
- Galvanizers Association of Australia (2009): Verbandsinformationen; <http://www.gaa.com.au> (09.07.2009)
- Giegrich, J. / Liebich, A. / Fehrenbach, H. (2007): Ableitung von Kriterien zur Beurteilung einer hochwertigen Verwertung gefährlicher Abfälle; Heidelberg
- Giegrich, J. / Liebich, A. (2008): Indikatoren / Kennzahlen für den Rohstoffverbrauch im Rahmen der Nachhaltigkeitsdiskussion; Heidelberg; unveröffentlicht
- Gordon, R. B./ Graedel, T. E. / Bertram, M. / Fuse, K. / Lifset, R. / Rechberger, H. / Spatari, S. (2003): The characterization of technological zinc cycles. *Resources, Conservation and Recycling*, Vol. 39, Nr. 2, 107-135
- Graf, G. G. (2005): Zinc; in: Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry; Weinheim: Wiley – VCH Verlag
- Initiative Zink (2009): Verbandsinformationen; www.initiative-zink.de (15.07.2009)
- Krüger, J. / Gerke, M. / Kiehne, C. / Köneke, M. / Manthey, J. / Neumann, K. / Rombach, E. / Schlimbach, J. / Winkler, P. (2001): Sachbilanz Zink. Institut für Metallhüttenkunde und Elektrometallurgie der RWTH Aachen
- ProBas [Prozessorientierte Basisdaten für Umweltmanagement-Instrumente] (2010): Datenbankabfrage der Datenbank ProBas; <http://www.probas.umweltbundesamt.de/php/index.php> (09.11.2010)
- Rebernick, G. (2007): Methode zur Analyse und Bewertung der Stoffflüsse von Oberflächen einer Stadt. Dissertation, Fakultät für Bauingenieurwesen, Technische Universität Wien
- Spatari, S. / Bertram, M. / Fuse, K. / Graedel, T. R. / Shelov, E. (2003): The contemporary European zinc cycle: 1-year stocks and flows. *Resources, Conservation and Recycling*, Vol. 39, Nr. 2, 137-160
- Tolcin, A. C. (2009): Minerals Commodity Summaries: Zinc. U. S. Geological Survey

Wildt, R. / Martin, M. (2009): Recycling – Zinc protects! Closing the loop. An Introduction to Recycling Zinc-Coated Steel; <http://www.zincworld.org/publications.html> (15.07.2009)

Wuppertal Institut (2003): Materialintensitäten von Materialien und Energieträgern im Überblick (MIT-Wertetabelle), Version 2 vom 28.10.2003;
http://www.wupperinst.org/info/entwd/index.html?beitrag_id=437&bid=169

X. Zinn

Christoph Lauwigi und Christoph Dressler,
Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg

X.1. Einleitung

X.1.1. Relevanz

Zinn weist eine hohe Umweltrelevanz auf. Da es zudem ein hohes Potential hinsichtlich eines Einsatzes in innovativen Anwendungen (bleifreie Lote, Display-Anwendungen) besitzt, wurde es als eines der zehn Metalle für eine weiterführende Betrachtung ausgewählt.

X.1.2. Charakteristika

Das silberweiße und sehr weiche Schwermetall Zinn ist bereits seit der Antike bekannt und besitzt seitdem eine erhebliche technische Bedeutung. Die physikalischen Eigenschaften von Zinn sind durch die drei Modifikationen geprägt, die Zinn im Metallgitter in Abhängigkeit von der Temperatur ausbildet. Bis zu einer Maximaltemperatur von 13,2 °C besteht α -Zinn, welches eine Dichte von 5,75 g/cm³ besitzt und ein kubisches Gitter ausbildet. Darüber liegt bis 162 °C β -Zinn in einem tetragonalen Gitter vor, was eine höhere Dichte von 7,31 g/cm³ bedingt. Zwischen 162 °C und dem Schmelzpunkt von 505 °C liegt γ -Zinn vor, das in einem rhombischen Gitter wiederum eine etwas geringere Dichte von 6,54 g/cm³ aufweist. Bei der Rekristallisation von β -Zinn zu α -Zinn kommt es zu einer Volumenvergrößerung von 21 %, wodurch die Zinnmatrix zerstört wird. Dabei bildet sich in der Regel Zinnpulver (Graf 2005).

Die meisten Zinnverbindungen sowie metallisches Zinn sind relativ ungiftig. Lediglich einige Organozinnverbindungen sind hochtoxisch (UBA 2008). Bekannt geworden sind diese durch Tributyl-Zinn (TBT), das als Bestandteil von Schiffsanstrichen den Bewuchs der Schiffshaut verhindert. Durch seine hohe Toxizität und die nicht kontrollierbare Ausbringung wird TBT seit 2003 hierfür nicht mehr eingesetzt (IMO 2009).

Zinn ist ein relativ seltenes Element. Sein Anteil an der Erdkruste beträgt 2-3 ppm und ist somit vergleichbar häufig wie Cerium und Yttrium. Zinnerze werden nur zu ca. 20 % in primären Lagerstätten abgebaut, die übrigen Zinnerze stammen aus sekundären Seifenlagerstätten in beispielsweise Flussdeltas.

Laut U. S. Geological Survey (2006) wird der weltweite Bedarf an Zinn jährlich um etwa 3 % ansteigen, wobei eine Verdoppelung dieser Rate als möglich angesehen wird, wenn neue Technologien mit erhöhtem spezifischen Einsatz von Zinn, vermehrt Anwendung finden. Als Beispiel für eine neue Technologie seien die bleifreien Lote genannt, deren Zinngehalt bis zu 99,3 % beträgt gegenüber 63 % bei den üblichen bleihaltigen Loten. Ebenfalls ist der steigende Zinnbedarf wachsender Volkswirtschaften wie z. B. China zu berücksichtigen. Da einerseits laut dem *International Tin Research Institute* 64 % des in Asien verbrauchten Zinns in die Elektro- und Elektronikindustrie fließen und andererseits China eine dominante Stellung in der Elektro- und Elektronikindustrie einnimmt, ist dort mit einem steigenden Zinnbedarf zu rechnen (ITRI 2009).

X.1.3. Anwendungsbereiche

Wichtige Anwendungsbereiche von Zinn sind:

- Verpackung von Nahrungsmitteln: Weißblech (Stahlblech mit einer Zinnbeschichtung) ist weltweit eines der wichtigsten Materialien zur Verpackung von Nahrungsmitteln und Getränken,
- Lötmetall: Zinn ist der Hauptbestandteil der meisten Weichlote, v. a. in der Elektro- und Elektronikindustrie,
- Legierungen: Hartzinn, Messing und Bronze sind industriell wichtige Legierungsmetalle, die aufgrund ihrer Eigenschaften in verschiedenen Anwendungen eingesetzt werden (z. B. auch in der Zahnmedizin als Bestandteil der Amalgamfüllung). Die verschiedenen Legierungen weisen unterschiedliche Zinngehalte auf.
- Chemikalien: Zinnverbindungen finden ihren wichtigsten Einsatz als Stabilisatoren in Polyvinylchlorid (PVC), werden aber auch in vielen anderen Bereichen eingesetzt wie z.B. als Katalysator bei der Herstellung von Polyurethan (PU), als Biozid und bei der Herstellung von keramischen Pigmenten,
- Glasherstellung: Zum einen wird Zinn in Verbindung mit anderen Materialien als Beschichtungsmaterial diverser Gläser verwendet. Zum anderen wird es beim sogenannten *Floatglas*-Verfahren, ein Verfahren zur Herstellung von Flachglas, als Bad aus flüssigem Zinn verwendet, über das flüssiges Glas gezogen wird.

X.2. Umweltbelastungen und Materialverluste

X.2.1. Abbau

Das wirtschaftlich bedeutsamste Mineral für die Zinnengewinnung ist Kassiterit (SnO_2) mit einem Zinngehalt von 76,5 %. Dieses tritt in abbauwürdiger Konzentration hauptsächlich in Seifen (Schwemmablagerungen) von Flussdeltas und am Meeresgrund auf.

Neben der Förderung als Hauptprodukt wird Zinn auch als Nebenprodukt der Aufbereitung von Erzen gewonnen, in denen es mit anderen Metallen vergesellschaftet ist wie Wolfram, Tantal und Blei. Untergeordnet wird es aus sulfidischen Mineralien wie Stannit ($\text{Cu}_2\text{FeSnS}_4$) gewonnen oder auch aus Anodenschlämmen der Kupferproduktion (Graf 2005). Im Jahr 2007 wurden weltweit 320.000 t Zinn gewonnen (Carlin 2009).

Umweltbelastungen und Materialverluste

Die Gewinnung von Zinn ist mit einer relativ großen Flächeninanspruchnahme ($71 \text{ m}^2/\text{t}$ Zinnerz) (Giegrich / Liebich 2008) und einem großen TMR (Globaler Materialaufwand, engl.: *Total Material Requirement*) mit ca. 2.000 t/t Zinn verbunden¹, insbesondere bei den vorherrschenden Seifenlagerstätten, die in der Regel im Tagebau abgebaut werden. Dies kann zu einschneidender Landschaftsveränderung, Grundwasserabsenkung und in der Folge negativen Einflüssen auf die umliegenden Landschaften bzw. die darin beheimateten Ökosysteme führen. Die zur Gewinnung der Erze erforderliche Energie, deren Erzeugung mit Emissionen einhergeht, wird im folgenden Kapitel (Kap. X.2.2) betrachtet.

Die Materialverluste während dem Abbau der Erze werden in dieser Studie mangels verfügbarer Angaben zum Einzelprozess nicht berücksichtigt, sondern in Kombination mit jenen der Aufbereitung (Kap. X.2.2).

X.2.2. Aufbereitung

Die Aufbereitung von Zinnerzen wird in der Literatur durchgehend als aufwendiger Prozess beschrieben. Problematisch ist bei der Erzaufbereitung einerseits deren geringe Korngröße, so dass der Einsatz hintereinander geschalteter gravimetrischer Trennmethode erforderlich ist. Andererseits erfordern Kristallverwachsungen oft weitere Zerkleinerungsprozesse und anschließende Trennprozesse.

Man erhält als Zwischenprodukt ein Zinnerzkonzentrat. Der Zinngehalt solcher Zinnerzkonzentrate beträgt je nach Art des Ausgangsmaterials zwischen 8 % und 70 %.

¹ Der TMR von Zinn streut über die verschiedenen Lagerstättentypen stark und reicht von ca. 300 t/t Zinn bis 6.000-9.000 t/t Zinn (Fesefeldt / Kippenberger 1987, Baku 1995, Wuppertal Institut 2003). Eine eigene Abschätzung unter Berücksichtigung der deutschen Importländer (bezogen auf Erze/Rohmaterial) ergibt einen für Deutschland spezifischen Wert zwischen diesen Extremen zu ca. 1.920 t/t Zinn.

Konzentrate mit geringerem Zinngehalt werden vor der weiteren Verarbeitung pyrometallurgisch auf 40-60 % Zinngehalt angereichert (Graf 2005).

Umweltbelastungen und Materialverluste

Mithilfe des „Umweltprofils Zinn“ lassen sich Folgen des Abbaus und der Aufbereitung von Zinnerzen darstellen (ProBas 2010); da das Umweltprofil Zinn den kompletten Lebensweg der Zinnproduktion betrachtet, wurden die entsprechenden Angaben nach Althaus (2007) auf die Prozessketten Abbau-Aufbereitung und die nachfolgenden Produktionsprozesse aufgeteilt (Tab. X-1 bzw. Tab. X-2). Zur Verbesserung der Vergleichbarkeit mit den anderen untersuchten Metallen und zur Konzentration auf die zu erwartenden Kernprobleme ist die Betrachtung auf den Treibhauseffekt, die Versauerung, die terrestrische Eutrophierung, den Flächenverbrauch und den kumulierten Rohstoffaufwand (KRA) begrenzt; für quantitative Angaben siehe Tab. X-1.

Mithilfe publizierter Wiederfindungsraten der Abbau- und Aufbereitungsmethoden ist von Zinnverlusten in Höhe von 14 % auszugehen (Althaus 2007). Bezogen auf die im Jahr 2007 gewonnene Menge von 320.000 t Zinn (vgl. Kap. X.2.2) entspricht dies einem Zinnverlust von 45.000 t.

Tab. X-1: Umweltbelastungen und jährliche Materialverluste bei Abbau und Aufbereitung von Zinnerzen

Prozesse	Umweltbelastung	Materialverluste
Abbau und Aufbereitung von Zinnerz	Treibhauseffekt: 9.450 kg CO ₂ -Äq./t Versauerung: 259 kg SO ₂ -Äq./t Terrestrische Eutrophierung: 12 kg PO ₄ -Äq./t Kumulierter Rohstoffaufwand: 707 t/t Flächenverbrauch: 71 m ² /t	45.000 t

Quelle: ProBas (2010), modifiziert nach Althaus (2007)

X.2.3. Verarbeitung von Zinnerzkonzentraten und Produktion von Zinnprodukten

Die weitere Verarbeitung der Zinnerzkonzentrate erfolgt überwiegend durch einen Schmelzprozess. Das dominierende Mineral im Zinnerzkonzentrat, Kassiterit (SnO₂), wird während des Schmelzprozesses mithilfe von Kohle in einem Drehrohrföfen bei 1.200 °C zu Zinn reduziert. Die hierbei entstehende Schlacke kann je nach Ausgangsmaterial noch 5-20 % Zinn enthalten. Auch die Flugstäube aus diesem Prozess enthalten nutzbare Mengen Zinn, weswegen sie ebenfalls zur Gewinnung von Zinn verwendet werden und somit den Prozess rentabler machen.

Die Schwierigkeit des Verarbeitungsprozesses liegt in der Trennung von Zinn und Eisen, da diese im Reduktionsprozess bei praktisch derselben Temperatur reduziert werden und sich in der Schmelze nicht trennen lassen. Man wendet daher einen zweistufigen Reduktionsprozess an, bei dem in der ersten Stufe Zinn mit Eisengehalten von ca. 0,5 % erreicht wird, aber die Materialverluste in die Schlacke hoch sind. Diese Schlacke wiederum ist Ausgangsmaterial für die zweite Stufe, ein Reduktionsschritt im Ofen, in dem unter stärker reduzierenden Bedingungen möglichst viel Zinn mit einem dann höheren Eisengehalt gewonnen wird (Graf 2005).

Der Mangel an weiterführenden Informationen zu einzelnen Produktionsprozessen spiegelt sich auch im Mangel an Informationen zu Umweltbelastungen und Materialverlusten wider. Aus diesem Grund werden in der vorliegenden Studie die Verarbeitung und Produktion (des Rohmaterials Zinn) kombiniert betrachtet.

Umweltbelastungen und Materialverluste

Die Verarbeitung des Zinnerzkonzentrates zu Zinn ist mit spezifischen Umweltbelastungen verbunden (Tab. X-2). Berücksichtigt wurden der Treibhauseffekt, die Versauerung, die terrestrische Eutrophierung, der kumulierte Rohstoffaufwand und der Flächenverbrauch. Die durch diese Wirkungskategorien abgebildeten Emissionen sind durch die Energiebereitstellung für die Raffination des Zinns begründet (Althaus 2007); für quantitative Angaben siehe Tab. X-2.

In einer Studie des USGS werden die Zinnverluste im Rahmen der Zinnproduktion des Jahres 1998 auf ca. 1 % geschätzt (USGS 2004). Dieser Wert wurde auch für die vorliegende Studie angenommen, so dass sich bezogen auf die globale Zinnproduktion ein jährlicher Zinnverlust von 4.000 t ergibt.

Tab. X-2: Umweltbelastung und jährliche Materialverluste bei der Verarbeitung von Zinnerzkonzentraten und Produktion von Primärzinn

Halbzeug	Umweltbelastung	Materialverluste
Zinn	Treibhauseffekt: 7.273 kg CO ₂ -äq/t Versauerung: 161 kg SO ₂ -äq/t Terrestrische Eutrophierung: 8,76 kg PO ₄ -äq/t Kumulierter Rohstoffaufwand: 471 t/t Flächenverbrauch: 47 m ² /t	3.000 t

Quelle: ProBas (2010), modifiziert nach Althaus (2007)

X.2.4. Nutzung von zinnhaltigen Produkten

Der Einsatz des Zinns in den verschiedenen Anwendungsbereichen wird vom International Tin Research Institute (ITRI) dokumentiert und jährlich veröffentlicht. Die Ergebnisse werden auf europäischer und globaler Ebene zusammengestellt (Tab. X-3). Je nach Nutzungsweise lassen sich die Anwendungsbereiche unterteilen in dissipative Nutzung und metallische Nutzung. Zur dissipativen Nutzung, die einen „direkten Verbrauch“ des Zinns bewirkt, zählt beispielsweise der Einsatz zinnorganischer Verbindungen in bioziden Wirkstoffen. Demgegenüber zählt zur metallischen Nutzung beispielsweise der Einsatz in Zinntellern (als Kunstgegenstand).

Tab. X-3: Einsatz von Zinn in diversen Anwendungsbereichen; Bezugsjahr 2007

Anwendung	Welt		Europa	
	Zinnproduktion [t/a]	Anteil an der weltweiten Produktion [%]	Zinnproduktion [t/a]	Anteil an der europäischen Produktion [%]
Lote	188.300	52	19.300	27
Weißblech	59.200	16	21.100	29
Chemikalien	47.200	13	12.400	17
Stabilisatoren			10.300	14
Katalysatoren			1.300	1,8
Glasbeschichtung			500	0,7
Synthese			300	0,4
Biozide			10	0,0017
Messing & Bronze	20.000	6	4.500	6
Glas	6.700	2	1.000	1
Andere	40.800	11	13.800	19
Total	362.100	100	72.200	100

Quelle: ITRI (2009), weitere Unterteilung der Chemikalien nach Nwaogu (2007)

Da nach Carlin (2009) weltweit im Jahr 2007 lediglich 320.000 t Primärzinn produziert wurden, kann der Differenzbetrag von 42.000 t nur durch Input aus dem Recycling oder aus Lagerbeständen erklärt werden. Zwar kann dies nicht mit Daten belegt werden, doch ein Input aus dem Recycling wird als plausibler eingestuft, daher wird dies für den Zinkhaushalt angenommen.

Mangels Daten für Deutschland sei hier die Verteilung für Europa dargestellt, die sich gerade in den beiden wichtigsten Anwendungsbereichen Weichlote und Weißblech signifikant von den Werten der weltweiten Anwendungen unterscheiden.

Da relevante prozentuale Verteilungen für Deutschland nicht bekannt sind, wird in dieser Studie von den europäischen Daten auf die Verteilung in Deutschland geschlossen. Da in Deutschland laut umweltökonomischer Gesamtrechnung (Destatis) im Jahr 2007 kein Zinn bergmännisch gewonnen wurde, ist davon auszugehen, dass das in Deutschland verwendete Zinn aus Importen, dem Recycling (Wiedergewinnung) und ggf. Lagerabnahmen stammt. Nach eigenen Berechnungen betrug diese Menge im Jahr 2005 ca. 27.000 t Zinn; die Exporte belaufen sich auf 20.500 t Zinn.

Umweltbelastungen und Materialverluste

Die Umweltbelastungen des Zinns in der Nutzungsphase variieren entsprechend dem Anwendungsbereich. Bei zinnhaltigen Chemikalien, deren Einsatz grundsätzlich als dissipativ eingeschätzt wird, ist die Umweltbelastung in erster Linie durch die Toxizität einiger Organozinnverbindungen gegeben. Da der Einsatz dieser Verbindungen seit einigen Jahren stark rückläufig ist, und auch das BfR zusammen mit dem UBA laut einer gemeinsamen Stellungnahme (UBA 2008) den Einsatz dieser Verbindungen weiter einzuschränken beabsichtigt, verliert diese Umweltbelastung an Bedeutung. Da bereits 2006 EU-weit die Verwendung von Organozinnverbindungen in Bioziden allgemein verboten wurde, ist diese Umweltbelastung im großräumigen Kontext rückläufig (UBA 2008). Tributylzinn wurde als prominentester Vertreter der Organozinnverbindungen jahrelang als Antifoulingmittel in Schiffsanstrichen verwendet. Nachdem im Jahr 2008 der Einsatz dieser Verbindungen als Biozid weltweit verboten wurde, ist nun mit einem starken Rückgang auch dieser Umweltbelastung zu rechnen (IMO 2009).

Die Toxizität weiterer Zinnverbindungen ist deutlich geringer, somit wird deren Eintrag in die Umwelt überwiegend hinsichtlich des Materialverlustes betrachtet. Für Lötmetall in der Nutzungsphase wird ein Materialverlust von 37 % angenommen, da dieser Anteil bezogen auf die Produkte, in welchen Lote eingesetzt werden, der Müllverbrennung zugeführt wird (Wichmann 2002). Eine Rückgewinnung von Zinn aus Filterstäuben von Müllverbrennungsanlagen findet aus wirtschaftlichen Gründen zurzeit nicht statt (Wichmann 2002). Diese Aussagen betreffen den europäischen und somit auch den deutschen Zinnhaushalt, für den weltweiten Zinnhaushalt waren keine Daten verfügbar. Für die Betrachtung der Materialverluste in dieser Studie bedeutet dies, dass 37 % der in Tabelle 3 als Lote angegebenen Menge als Materialverluste angesehen werden, also 7.100 t.

Die Recyclingrate von Weißblechdosen als europaweit wichtigster Anwendungsbereich des Zinns beträgt weltweit 68 % (Deutschland: 91 %) (Habersatter et al. 1998). Hieraus folgt, dass 32% des Zinns nach der Nutzung als Verlust zu werten sind. Dies sind weltweit 40.300 t/a.

Nutzung von Zinn zur industriellen Produktion

Der Einsatz von Zinn im Rahmen der Glasherstellung umfasst weltweit lediglich 2 % und europaweit 1 % der Zinnproduktion. Zwar handelt es sich hier um einen geringen Fluss, doch ist diese Anwendung hinsichtlich des Zinnlagers von Bedeutung. Bei der *Floatglas*-Herstellung wird flüssiges Glas über ein Zinnbad geleitet, wodurch die Glasoberfläche sehr plan wird. Da das Zinnbad 11-15 Jahre in Betrieb ist (Pfaender 1997), wird es als Lager angesehen. Die Spuren des Zinns, die hierbei am Glas haften bleiben, werden als vernachlässigbar eingeschätzt.

Daneben wird Zinn zur Beschichtung von Verpackungsglas mit Zinnoxid eingesetzt. Dieser Einsatz stellt eine dissipative Nutzung dar. Nach Angaben von Nwaogu (2007) wurden im Jahr 2007 in Europa 500 t Zinn im Rahmen der Glasbeschichtung eingesetzt, welche somit als Materialverlust angesehen werden.

Lager

Über die Größe des Lagers von Zinn und dessen durchschnittliche Lebensdauer waren keine Angaben verfügbar. In einigen Anwendungsbereichen ist die Nutzung des Zinns auf längere Dauer ausgelegt. Für Zinn werden daher die folgenden Anwendungsbereiche als Lager betrachtet:

- Karosseriebau,
- Dentallegierungen,
- Kupferlitzen,
- Legierungsbestandteil in Bronze/Messing,
- Supraleiter.

Die Lager in diesen Anwendungsbereichen können mangels Angaben in der Fachliteratur nicht quantifiziert werden. Um trotzdem die Lager in die Berechnung dieser Studie einfließen zu lassen, wurden aus Tabelle 3 die Anwendungsbereiche „Glas“, „Andere“ und die Hälfte von „Messing & Bronze“ zusammengefasst. In letztgenanntem Bereich wurde eine Recyclingrate von 50 % angenommen (siehe Kap. X.2.7). Unter diesen Annahmen ergibt sich für das Jahr 2007 eine Lagerzunahme ein Zuwachs des Lagers von 62.000 t Zinn (Summe der diversen Anwendungsbereiche).

Tab. X-4 fasst die Umweltbelastungen und Materialverluste zusammen, die im Rahmen der Nutzung von Zinn auftreten.

Tab. X-4: Umweltbelastungen und jährliche Materialverluste im Rahmen der Nutzung von Zinn; Materialverluste sind getrennt für die Bezugsräume Europa und Welt dargestellt

Anwendungsbereich	Produkt	Umweltbelastung	Jährliche Materialverluste	Bemerkungen
Europa				
Chemikalien	PVC-Stabilisator	Diffuser Abtrag, Innenraumluft/Staub; toxische Belastung	10.300 t	Hauptanwendung der Chemikalien
	Katalysatoren	Keine Angaben	1.300 t	
	Biozid	Toxische Wirkung, in aquatischer Umwelt	ca. 10 t	Verwendung stark rückläufig
	Glasherstellung		500 t	Glasbeschichtung
Legierung	Bronze	nicht bekannt	nicht bekannt	
	Messing und andere Legierungen	nicht bekannt	nicht bekannt	
Weißblech-Verpackungen	Getränkedosen	nicht bekannt	6.750 t	Weißblech gesamt. Annahme von Recyclingquote für die Welt.
	Konserven	nicht bekannt		
Lote	Bleifreie Lote	nicht bekannt	7.100 t	Lote gesamt
	Bleihaltige Lote	nicht bekannt		
Welt				
Chemikalien		nicht bekannt	47.200 t	
Weißblech-Verpackungen		nicht bekannt	40.300 t	
Lote		nicht bekannt	nicht bekannt	

X.2.5. Recycling von Zinn

In verschiedenen Anlagentypen werden Zinnlegierungen als Nebenprodukt zurückgewonnen oder werden Zinnschrotte direkt als Input für die Zinnherstellung eingesetzt (Balver 2009). Dies umfasst neben Neuschrotten auch Altschrotte².

Zinnhaltiger Elektro- und Elektronikschrott wird zu 17-21 % dem Recycling zugeführt³ (Wichmann 2002). Die technische Rückgewinnungsrate bezogen auf das Zinn in Elektro- und Elektronikschrott beträgt in Europa 80-100 %. Daraus resultiert für Zinn eine Recyclingrate (gesamt) von 14-21 %.

² Neuschrott ist der während der Produktion anfallende Schrott; Altschrott umfasst Produkte, die vom Endverbraucher entsorgt wurden.

³ N.B.: zeitlicher Bezug vor Einführung des Elektro- und Elektronikgerätegesetzes

In gleichem Maße werden Schrotte zinnhaltiger Kupferlegierungen wie Bronze dem Recycling zugeführt (21 %). Das in diesen Legierungen enthaltene Zinn wird als sogenanntes Mischzinn während des Kupferrecyclings wiedergewonnen. Mangels quantitativer Angaben zur Verteilung wurde in vorliegender Studie eine Recyclingrate von 50 % des in Kupferprodukten eingesetzten Zinns angenommen.

Die Recyclingrate von Weißblechdosen als europaweit wichtigstem Einsatzbereich des Zinns beträgt weltweit 68 %. Jedoch bezieht sich diese Recyclingrate lediglich auf Altschrott (d.b. Weißblechdosen nach der Nutzung) und hierbei ausschließlich auf den Stahlanteil; die Zinnbeschichtung des Stahl diffundiert während des Recyclingprozesses in den Stahl, wodurch es ein sehr schwer trennbares Gemisch bildet und somit dem technologischen Zinnkreislauf entzogen wird (Habersatter et al. 1998). Laut Carlin (1998) war in den Vereinigten Staaten die Entzinnung von Weißblech die wichtigste Quelle für Sekundärzinn; der Anteil des gesammelten Weißblechs, der tatsächlich entzinnt wird, ist jedoch nicht spezifiziert.

Müller (2009) schätzt hinsichtlich des Zinnkreislaufs der Vereinigten Staaten das Recycling von Bleibatterien als größte Einzelquelle für Sekundärzinn ein. Zinn wird in Bleibatterien als Lotmaterial verwendet und kann beim Recycling wiedergewonnen werden. Quantitative Angaben zu diesem Prozess sind nicht verfügbar. Die Gesamtrecyclingrate von Zinn in den Vereinigten Staaten⁴ wurde auf 22 % bezogen auf das produzierte Zinn geschätzt (USGS 2004).

Angaben zur weltweiten Wiederverwertung von Zinn sind nicht verfügbar. Aus den Angaben aus Tabelle 3 und den zugehörigen Recyclingraten ergibt sich hinsichtlich des weltweit eingesetzten Zinns eine gewichtete Recyclingrate von 15 %, das entspricht einer Menge von 54.000 t/a. Daraus lässt sich schließen, dass im Jahr 2007 ca. 33.000 t Zinn aus Lagerbeständen dem Recycling zugeführt wurden. Es ist zu beachten, dass europaweit die Verteilung des Zinns auf die verschiedenen Einsatzbereiche variiert (Tab. X-3).

Unter der Annahme, dass die Recyclingraten der einzelnen Anwendungsbereiche in den Vereinigten Staaten gleich groß sind wie diejenigen in Deutschland, ergibt sich für Deutschland eine durchschnittliche Recyclingrate von 9 % bezogen auf die gesamte jährlich eingesetzte Zinnmenge. Die deutliche Abweichung zwischen den Recyclingraten der beiden Länder (weltweit/Vereinigte Staaten 15 %, Europa/Deutschland 9 %) lässt sich im Wesentlichen durch die stark differierenden Anteile des Lötzinns am Gesamteinsatz erklären (weltweit/ Vereinigte Staaten 16 %; Europa/Deutschland 29 %). Bezogen auf Deutschland entspricht dies einer Menge von ca. 660 t Zinn, die nach der Nutzung rezykliert werden.

⁴ Nach Angabe des U. S. Geological Surveys wird in den Vereinigten Staaten weltweit das meiste Zinn aus Schrott zurückgewonnen.

Umweltbelastung und Materialverluste

Es sind keine ausreichend genauen Angaben zu den energetischen und stofflichen Bedingungen verfügbar, jedoch ist wegen des hohen Energieaufwandes bei der Primärzinnherstellung davon auszugehen, dass das Recycling sowohl energetisch günstiger, als auch ressourcenschonender als die Primärzinnherstellung ist.

Tab. X-5: Umweltbelastungen und jährliche Materialverluste bei des Recyclings von Zinn

rezyklierter Stoffstrom	Produkt	Umweltbelastung	Materialverluste	Bemerkungen
Weißblechverpackungen	Getränkedosen	nicht bekannt	Europa: 14.350 t Welt: 18.900 t	Weißblech gesamt. Annahme der europäischen Recyclingquote für die Welt
	Konserven			
Lote		nicht bekannt	nicht bekannt	

X.2.6. Zinn in die Deponien

50 % des Zinns in Kupferlegierungen sowie 9 % des Zinns in Weißblech werden nicht dem Recycling zugeführt (letzteres in Bezug auf Weißblechrecycling, nicht Zinnrecycling). Die Summe dieser Anteile wird in vorliegender Studie als Fluss in die Deponien angesehen.

Da Elektro- und Elektronikgeräte bis zur Einführung des Elektro- und Elektronikgerätegesetzes (ElektroG) im Jahr 2003 zu 42 % deponiert wurden (Wichmann 2002), ist aufgrund der in ihnen enthaltenen Lote von einem gewissen Eintrag von Zinn in die Deponien auszugehen. Genauere oder neuere Zahlen hierzu liegen nicht vor.

Zum Verhalten von Zinn in Deponien liegen in der Literatur keine allgemeinen Angaben vor. Organozinnverbindungen in PVC werden im Deponiekörper gelöst und gelangen in den Deponieabfluss, doch wird aufgrund der wirksamen Sickerwasserreinigung keine relevante Umweltbelastung erwartet (Floyd 2005). Weltweit ist die Situation differenziert einzuschätzen: Ein Eintrag in relevanter Höhe ist nicht auszuschließen, jedoch lässt sich dieser mangels Angaben nicht quantifizieren.

X.2.7. Zinn in die Umwelt und andere Senken

Durch den Einsatz von Zinn in den oben genannten Anwendungen kommt es zu Einträgen in die Umwelt und andere Senken. Der Großteil des Eintrags von Zinn in die Umwelt wird durch den dissipativen Einsatz von Chemikalien ausgelöst. Da der Einsatz von Zinn in den als problematisch einzustufenden Biozide stark rückläufig ist, ist die direkte Umweltbelastung durch den Eintrag von Zinn ebenfalls als rückläufig anzusehen.

X.3. Fazit

X.3.1. Verbesserungspotential

Bei Betrachtung des Zinnhaushaltes sind Verbesserungspotentiale hinsichtlich der Umweltbelastungen und Materialverluste in verschiedenen Prozessen erkennbar. Einige Probleme sind jedoch – bei gleichbleibender Einsatzmenge – mangels Alternativen und/oder technischer Möglichkeiten unvermeidlich. Beispielsweise ist eine Trennung von Zinn und Stahl aus der Schmelze technisch ausgesprochen schwierig, da diese beiden Metalle bei sehr ähnlicher Temperatur reduziert werden.

Beim Abbau von Zinnerzen findet eine große Flächeninanspruchnahme statt und es fallen in der Regel große Mengen nicht verwerteter Extraktion an. Der TMR ist mit ca. 2.000 t/t Zinn mittelgroß. Zwar ist dieser Wert deutlich geringer als beispielsweise diejenigen von Edelmetallen (z.B. Gold und Palladium), doch in Kombination mit dem höheren Produktionsvolumen bei Zinn werden damit hohe absolute Belastungen begründet. Um einschneidende Landschaftsveränderungen, Grundwasserabsenkungen und deren negativen Folgen für Ökosysteme zu minimieren, ist es denkbar, künftig vorrangig Minen zu erschließen, die einen möglichst kleinen spezifischen ökologischen Rucksack beim Abbau aufweisen; aufgrund der Dominanz der Seifenlagerstätten wird hier jedoch nur ein geringes Verbesserungspotential gesehen, so dass mögliche Effizienzsteigerungen in den Folgeprozessen als entsprechend bedeutend eingeschätzt werden.

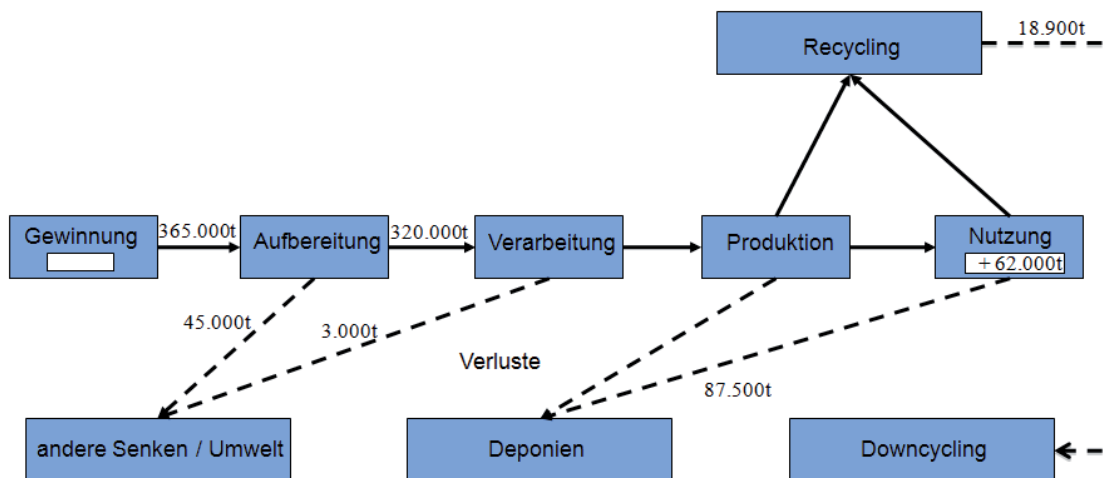
Bei der Nutzung des Zinns in Form von Messing und Bronze ist nur ein geringes Verbesserungspotential zu erkennen. Auch hinsichtlich der Glasherstellung besteht nur ein geringes Verbesserungspotential, da das Verfahren der *Floatglas*-Herstellung kaum Zinnverluste aufweist.

Der Einsatz in dissipativen Nutzungen von Zinn weist Verbesserungspotenzial hinsichtlich des Zinnverlustes auf. Der Einsatz von Zinn in Bioziden ist stark rückläufig, wodurch auch der entsprechende Materialverlust proportional abnehmen wird. Bei den PVC-Stabilisatoren ist eine Substitution der Organozinnverbindungen möglich, doch die Entwicklung von Alternativen ist zurzeit noch nicht ausreichend fortgeschritten, so dass ein Verbesserungspotential noch nicht quantifiziert werden kann (Kuhn 2005).

Grundsätzlich besteht die Möglichkeit, jene Stoffflüsse zu verringern, welche Zinn dem Zinnkreislauf entziehen. Dies kann am Beispiel des Lötzinns als weltweit größtem Einsatzbereich verdeutlicht werden: Der bedeutendste Anwendungsbereich des Lötzinns sind Elektro- und Elektronikgeräte, für die im globalen Maßstab noch kein nennenswertes Recycling besteht. Gemäß den für diese Studie verwendeten Quellen wurden in Deutschland im Jahr 2001 14-21 % des Zinns rezykliert, der übrige Teil wurde nach Abfallbehandlung deponiert (37 %) oder direkt deponiert (42 %) (Wichmann 2002). Es ist zu erwarten, dass die Recyclingrate in Deutschland infolge des Elektro- und Elektronikgerätegesetzes angestiegen ist.

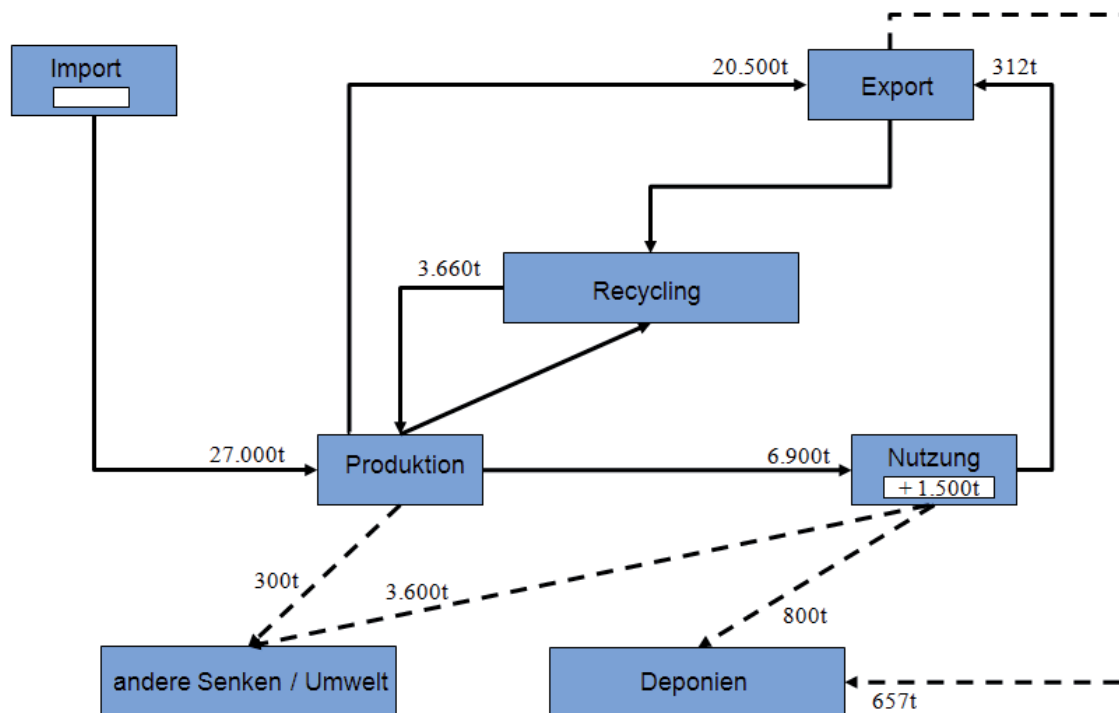
Es sind zielgerichtete Schritte hin zu einer Wiedergewinnung von Zinn hinsichtlich der verschiedenen Anwendungsbereiche bzw. Produktgruppen notwendig, um die Zinnverluste entlang des gesamten Lebensweges zu verringern und effizienter bzw. effektiver mit dem Werkstoff Zinn umzugehen. Sollte sich bestätigen, dass Zinn aus Weißblech bei angemessenem Aufwand nur in vernachlässigbarer Menge rezykliert werden kann, wäre die weitere Verwendung von Weißblech als kritisch anzusehen, da sie eine dem Recycling von Zinn unzugängliche Senke darstellen würde.

Abb. X-1: Stoffhaushaltssystem Zinn mit jährlichen Flüssen; Bezugsraum: Welt



Bei der Darstellung des Zinnhaushalts von Deutschland (Abb. X-2) wurden die Importe und Exporte mit einbezogen, da ein Abbau an Zinnerzen in Deutschland nicht stattfindet. Diese Daten sind der deutschen Außenhandelsstatistik von 2005 entnommen. Zwar weichen diese Angaben zeitlich von den meisten übrigen Daten des Stoffhaushaltssystems ab (Stichjahr 2007), doch aufgrund der eingeschränkten Datenverfügbarkeit wird diese Abweichung des Bezugsjahrs als akzeptabel eingeschätzt.

Abb. X-2: Stoffhaushaltssystem Zinn mit jährlichen Flüssen; Bezugsraum: Deutschland



X.3.2. Methodische Schwierigkeiten

Relevante Datenlücken

Im Verlauf dieser Studie sind deutliche Datenlücken erkennbar geworden, die in den betroffenen Abschnitten entsprechend gekennzeichnet sind. Hinsichtlich der Umweltbelastungen konnten die Datenlücken in den entscheidenden Fällen durch begründete Annahmen geschlossen werden, so dass die relevanten Teilschritte für den Zinnhaushalt ein Mindestmaß an Information aufweisen. Dies ist in den entsprechenden Kapiteln erläutert.

Die Datenverfügbarkeit für den Zinnhaushalt Deutschlands wird als problematisch eingestuft, was jedoch durch Übertragung europäischer Daten auf Deutschland näherungsweise gelöst werden konnte. Insbesondere die Datenlücken hinsichtlich des Recyclings werden als problematisch angesehen. Beispielsweise ist weiterhin unbekannt, wie viel Zinn von Weißblechschrotten zurückgewonnen werden kann. Laut Habersatter et al. (1998) wird ein Teil der Weißblechdosen entzinnt, doch die Menge daraus rückgewonnenen Zinns ist nicht bekannt. Mangels aktuellerer Angaben wurde angenommen, dass eine Rückgewinnung von Zinn aus Weißblechdosen bisher nicht bzw. in vernachlässigbarem Umfang stattfindet.

X.4. Referenzen

- Althaus, H.-J. (2007): Tin; in: Ecoinvent v2.0, Part 10; Dübendorf, Switzerland
- Baku, B. (1995): Materialintensitätsanalyse von Zinn. Interner Bericht an die Abteilung Stoffströme und Strukturwandel des Wuppertal Instituts für Klima, Umwelt und Energie; Wuppertal
- Balver (2009): Firmeninformationen;
http://www.balverzinn.com/deutsch/unternehmen_umweltschutz.php (17.08.2009)
- Bureau of Mines (1986): Tin availability-market economy countries. Information Circular, IC 9086
- Carlin, J. F. (1998): Tin recycling in the United States in 1998. U. S. Geological Survey, U. S. Department of the Interior; Reston, Virginia
- Carlin, J. F. (2006): Minerals Yearbook 2006: Tin. U. S. Geological Survey
- Carlin, J. F. (2009): Minerals Commodity Summaries: Tin. U. S. Geological Survey
- ElektroG (2005): Gesetz über das Inverkehrbringen, die Rücknahme und die umweltverträgliche Entsorgung von Elektro- und Elektronikgeräten (Elektro- und Elektronikgerätegesetz)
- Fesefeldt, K. / Kippenberger, C. (1987): Befahrung primärer Zinnvererzungen verschiedenartiger Genese in der Volksrepublik China. Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe; Hannover
- Floyd, P. (2005): Risk assessment studies on targeted consumer applications of certain organotin compounds. Risk & Policy Analysts Limited; London
- Frank, H. (1991): Weißblechverpackungen: Umweltbelastungen bei der Produktion und Entsorgung. Abfall vermeiden. Institut für ökologisches Recycling (IföR) (Hg.)
- Giegrich, J. / Liebich, A. (2008): Indikatoren / Kennzahlen für den Rohstoffverbrauch im Rahmen der Nachhaltigkeitsdiskussion; Heidelberg; unveröffentlicht
- Graf, G. G. (2005): Tin, tin alloys and compounds; in: Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry; Weinheim: Wiley – VCH Verlag
- Habersatter, K. / Fecker, I. / Dall'Acqua, S. / Fawer, M. / Fallscheer, F. / Förster, R., Maillefer, C. / Ménard, M. / Reusser, L. / Som, C. / Stahel, U. / Zimmermann, P. (1998): Ökoinventare für Verpackungen. Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft (BUWAL); Bern
- IMO [International Marine Organisation] (2009): Organisationsinformationen.
http://www.imo.org/conventions/mainframe.asp?topic_id=529 (19.08.2009)
- ITRI [International tin research institute] (2009): Firmeninformationen.
<http://www.itri.co.uk> (15.08.2009)

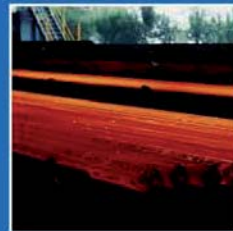
- Kuhn, K. J. (2005): PVC-Stabilisierung mit nachwachsenden Rohstoffen. Crompton Vinyl Additives; Lampertheim, Deutschland
- Müller, D. B. / Izard C. F. (2009): Challenges and opportunities for long-term tin resource management
- Nwaogu, T. A. / Zarogiannis, P. / Tuffnell, N. / Floyd, P. (2007): Impact Assessment of Potential Restrictions on the Marketing and Use of Certain Organotin Compounds. Risk & Policy Analysts; London
- Pfaender, H. G. (1997): Das Schott – Glaslexikon; Landsberg am Lech: mvg-Verlag
- ProBas [Prozessorientierte Basisdaten für Umweltmanagement-Instrumente] (2010): Datenbankabfrage der Datenbank ProBas;
<http://www.probas.umweltbundesamt.de/php/index.php> (09.11.2010)
- UBA [Umweltbundesamt] (2008): Aktualisierte Gemeinsame Stellungnahme Nr. 032/2008 des Umweltbundesamtes und des Bundesinstitutes für Risikobewertung (05.02.2008);
<http://www.umweltbundesamt.de/gesundheit/publikationen/organozinnverbindungen.pdf> (27.10.2009)
- Wichmann, H. / Sprenger, R. / Dettmer, F. T. / Schmidt-Nädler, C. / Bahadir, M. (2002): Wert- und Schadstoffpotentiale von elektronischen Bauteilen; in: Fortschritt-Berichte VDI, Reihe 15; Düsseldorf: Verlag C. H. Beck, 138 Seiten
- Wuppertal Institut (2003): Materialintensitäten von Materialien und Energieträgern im Überblick (MIT-Wertetabelle), Version 2 vom 28.10.2003;
http://www.wupperinst.org/info/entwd/index.html?beitrag_id=437&bid=169

Rainer Lucas
Henning Wilts
unter Mitarbeit von Irina Sokolova

Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie GmbH

Weltweite Wiedergewinnung von Platingruppenmetallen (PGM)

Meilensteinbericht des Arbeitspakets 2.2 des Projekts
„Materialeffizienz und Ressourcenschonung“ (MaRes)



Kontakt zu den Autor(inn)en:

Rainer Lucas

Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie GmbH
42103 Wuppertal, Döppersberg 19

Tel.: +49 (0) 202 2492 -260, Fax: -138

Mail: rainer.lucas@wupperinst.org

**„Materialeffizienz und Ressourcenschonung“
(MaRes) – Projekt im Auftrag des BMU I UBA**

Projektlaufzeit: 07/2007 – 12/2010

Projektleitung:

Dr. Kora Kristof / Prof. Dr. Peter Hennicke

Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie GmbH
42103 Wuppertal, Döppersberg 19

Tel.: +49 (0) 202 2492 -183 / -136, Fax: -198 / -145

Mail: kora.kristof@wupperinst.org

peter.hennicke@wupperinst.org

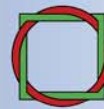
© Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie GmbH

Weitere Informationen zum Projekt

„Materialeffizienz und Ressourcenschonung“ (MaRes)
finden Sie unter **www.ressourcen.wupperinst.org**

Gefördert wird das Vorhaben im Rahmen des UFOPLAN
durch das BMU und das UBA, Förderkennzeichen: 3707 93 300

Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung
liegt bei den Autor(inn)en.



Wuppertal Institut
für Klima, Umwelt, Energie
GmbH

**Wuppertal Institut
in Kooperation mit**

BASF
Borderstep
CSCP
Daimler
demea – VDI / VDE-IT
ECN
EFA NRW
FhG IAO
FhG UMSICHT
FU Berlin
GoYa!
GWS
Hochschule Pforzheim
IFEU
Institut für Verbraucherjournalismus
IÖW
IZT
MediaCompany
Ökopol
RWTH Aachen
SRH Hochschule Calw
Stiftung Warentest
ThyssenKrupp
Trifolium
TU Berlin
TU Darmstadt
TU Dresden
Universität Kassel
Universität Lüneburg
ZEW



Bundesministerium
für Umwelt, Naturschutz
und Reaktorsicherheit

**Umwelt
Bundes
Amt** 
Für Mensch und Umwelt

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung.....	10
2	Rahmenbedingungen für die internationale Stoffstromsteuerung.....	13
2.1	Strukturen der PGM-Primärförderung.....	13
2.2	Kritikalität der Rohstoffversorgung	15
2.3	Hauptanwendungsfelder und Trends in der Nachfrageentwicklung.....	17
2.3.1	Anwendungsfelder und technische Funktionen.....	17
2.3.2	Einflussfaktoren und Trends des PGM-Verbrauchs.....	18
2.4	Bedeutung, Entwicklung und Probleme des PGM-Recyclings.....	22
2.4.1	Umweltpolitische Relevanz	22
2.4.2	Defizite im Stoffstrommanagement.....	23
2.4.3	Beitrag des Recyclings zur Rohstoffversorgung.....	24
3	Untersuchung des Handlungsfeldes Autoabgaskatalysatoren (Autokats)	26
3.1	Ökonomische Faktoren	26
3.1.1	Nachfragestrukturen und Versorgungssicherheit.....	26
3.1.2	Zukünftige Nachfrageentwicklung.....	27
3.2	Regulatorische und institutionelle Faktoren	28
3.3	Technische Faktoren	31
3.3.1	Technische Funktion der Katalysatoren und ihr PGM-Gehalt	31
3.3.2	Verfahrensschritte des PGM-Recyclings.....	35
3.3.3	PGM-Verluste durch Ineffizienzen in der Recyclingkette.....	35
3.4	Verlagerung der PGM-Stoffströme in andere Volkswirtschaften durch den Export von gebrauchten PKW	38
3.4.1	Herkunft und Verbleib der Fahrzeuge in der EU27.....	38
3.4.2	Gebrauchtwagen-Export aus Deutschland Auswertung der COMEXT-Datenbank	38
3.4.3	Auswertung der Exporte aus Deutschland in andere EU-Staaten (REGINA-Datenbank).....	40
3.4.4	Direkte Gebrauchtwagenexporte aus Deutschland in Nicht-EU-Staaten.....	42
3.4.5	Exporte aus der EU in Nicht-EU-Staaten	43
3.4.6	Abschätzung der PGM-Verluste.....	46
3.4.7	Bewertung der Datenlage.....	48
3.5	Länderstudien zur PGM-Rückgewinnung aus Autokatalysatoren	50
3.5.1	Russland.....	52
3.5.2	Polen.....	62
3.5.3	Baltische Länder.....	72
3.5.4	Abschätzung der zukünftigen Wachstumspotenziale in ausgewählten osteuropäischen Ländern.....	77
3.6	Maßnahmenvorschläge für den Bereich der Autoabgaskatalysatoren.....	84
3.6.1	Maßnahmenfeld „Festlegung von Qualitätsstandards für Katalysator-Logistik und Katalysator-Entmantelung“	85
3.6.2	Maßnahmenfeld „Aufbau eines internationalen Redistributionssystems“	86
3.6.3	Maßnahmenfeld „Gebrauchtwagenexporte/-importe“	90
3.6.4	Maßnahmenfeld „Technologie- und Wissenstransfer für die neuen EU-Beitrittsländer und ausgewählte CEC-Staaten“	93

4	Maßnahmenfeld Elektro- und Elektronikschrott	98
4.1	Einleitung	98
4.2	WEEE – ressourcenpolitische und ökologische Relevanz	99
4.2.1	<i>IKT und UE als Treiber des Rohstoffverbrauchs</i>	100
4.2.2	<i>PGM Einsatzbereiche im Elektro-/Elektronik-Bereich</i>	102
4.2.3	<i>EAG-Behandlung und Recycling</i>	105
4.2.4	<i>Exporte von gebrauchten Elektrogeräten und Elektroaltgeräten</i>	110
4.3	Rechtlicher Rahmen	117
4.3.1	<i>Basler Übereinkommen</i>	117
4.3.2	<i>EG-Elektroaltgeräte-Richtlinie</i>	117
4.3.3	<i>ElektroG</i>	120
4.4	Identifizierung von PGM- Verlusten	121
4.4.1	<i>Beschreibung der Datenlage für PGM in EEE und EAG</i>	122
4.4.2	<i>Handys</i>	127
4.4.3	<i>Bildschirme</i>	149
4.5	Maßnahmenvorschläge	168
4.5.1	<i>Bewertung und Grenzen der bisherigen Einzelmaßnahme</i>	169
4.5.2	<i>Strategieansatz der erweiterten Herstellerverantwortung</i>	171
4.5.3	<i>Allgemeiner Ansatz zur Substitution von Primär-PGM: Mindestvorgabe für Einsatz von Sekundär-PGM (mit Zertifikat)</i>	174
4.5.4	<i>Konkrete Maßnahmenvorschläge für Mobiltelefone</i>	177
4.5.5	<i>Konkrete Maßnahmen für PGM in Bildschirmen</i>	183
4.6	Systemorientierte Beschreibung des Stoffstromregimes	194
4.7	Prioritäre Maßnahmen für einen Systemwandel	197
4.7.1	<i>Durchsetzung von einheitlichen Qualitätsstandards in internationalen Wertschöpfungsketten für alle Verwertungsstufen der PGM-Rückgewinnung</i>	197
4.7.2	<i>Verschärfung der Dokumentationspflichten bei der Ausfuhr gebrauchter Technologiegüter (insbesondere für den Handel)</i>	198
4.7.3	<i>Klare Kriterien für den Export von gebrauchten Konsumgütern außerhalb der EU und deren Überprüfung durch die Zollbehörden</i>	198
4.7.4	<i>Vertraglich abgesicherte Standards in der Recyclingkette</i>	199
4.8	Weiterer Forschungsbedarf	200
5	Zusammenfassung	202
	Literatur	207
	Anhang	228

Abbildungen

Abb. 1: Platinmetallvorkommen und platinmetallproduzierende Länder.....	14
Abb. 2: Bewertung der Kritikalität	16
Abb. 3: Weltweite Brutto-PGM-Nachfrage nach Sektoren 2010 (in 1000 Tonnen).....	19
Abb. 4: Verwendung von Platin und Palladium nach Anwendungsfeldern	20
Abb. 5: Platinpreis je Feinunze 2007 - 2010.....	21
Abb. 6: Palladiumpreis je Feinunze 2007 - 2010	22
Abb. 7: Entwicklung der PKW-Flotte in der EU27 bis 2030	28
Abb. 8: Globale Redistributionsstrukturen im Bereich des Kat-Recyclings	31
Abb. 9: Darstellung des PGM-Recyclings aus Auto-Katalysatoren und potentieller Verlustpunkte.....	36
Abb. 10: Verlustpotenziale in den Bearbeitungsstufen de Fahrzeugrecyclings In Deutschland.....	37
Abb. 11: Herkunft und Verbleib von Fahrzeugen in der EU27 in 2008.....	38
Abb. 12: Verbleib der gelöschten Pkw in Deutschland 2008.....	39
Abb. 13: Wiederanmeldungen von Gebrauchtwagen aus Deutschland	42
Abb. 14: Altersstruktur exportierter Gebrauchtwagen im europäischen Vergleich, Durchschnittswerte 2004 bis 2009.....	47
Abb. 15: Unsicherheiten gewonnener PGM-Mengen.....	50
Abb. 16: Verteilung des Fahrzeugbestands in Russland.....	54
Abb. 17: Einführung von Emissionsstandards in Russland	56
Abb. 18: Der russische Automarkt 2010 und die Effekte der Abwrackprämie	58
Abb. 19: Entwicklung des Fahrzeugbestandes (Pkw) in Polen (in 1000 Einheiten)	62
Abb. 20: Fahrzeugbestand (Pkw) pro 1000 Einwohner in Polen	63
Abb. 21: Regionale Unterschiede in der Pkw-Bestandsdichte in Polen	64
Abb. 22: Altersstruktur von Pkw in Polen in 2009.....	65
Abb. 23: Altersstruktur der nach Polen importierten Fahrzeugen, 2007 bis 2009	66

Abb. 24: Anzahl abgemeldeter Fahrzeuge im Jahr	67
Abb. 25: Anzahl der Demontagestationen und Sammelstellen zum 31. Dezember	68
Abb. 26: Standort der Altfahrzeug-Demontage-Stationen in Estland, Stand: 2006	74
Abb. 27: Handelskette von Altkatalysatoren auf dem baltischen Markt	76
Abb. 28: Zusammenhang zwischen BIP und Fahrzeugdichte pro Einwohner	78
Abb. 29: PGM-Nachfrage in Osteuropa bis 2014,	84
Abb. 30: Purchasing Organisation Webasto AG	89
Abb. 31: Zusammensetzung WEEE in der EU 2005	100
Abb. 32: Entwicklung der Anzahl chemischer Elemente in einem Intel-Computerchip	101
Abb. 33: Schematischer Aufbau eines MLCC.....	103
Abb. 34: Die Recycling-Wertschöpfungskette von Elektroaltgeräten	106
Abb. 35: Metallverteilung in einem E-Schrott-Schredder in Deutschland	108
Abb. 36: Transportwege für WEEE und Schrottschiffe in Südostasien	113
Abb. 37: Umsetzung der WEEE-Direktive im Jahr 2007	118
Abb. 38: PGM-Ströme in Elektrogeräten, für Deutschland	122
Abb. 39: Verlustmengen EEE und EAG in 2007 in t.....	126
Abb. 40: Stoffliche Zusammensetzung eines Handys 2005	128
Abb. 41: Anteile an Masse, Wert und TMR verschiedener Stofffraktionen im Handy.....	128
Abb. 42: Entwicklung des Handys seit 1980.....	130
Abb. 43: Entwicklung der Verkaufszahlen für Handys in Deutschland 1992 bis 2008 in Mio. Stück pro Jahr.....	132
Abb. 44: Mobiltelefone je 100 Einwohner 2006 in verschiedenen Ländern	133
Abb. 45: Teilnehmer-Marktanteile der Handy-Netzbetreiber in Deutschland.....	135
Abb. 46: Gesamte Stoffflüsse von Handys in Deutschland 2007	136
Abb. 47: Aufbau eines Handy-Sammelsystems	138

Abb. 48: Internetangebote für den Verkauf von gebrauchten Handys.....	142
Abb. 49: Globale Exporte von Handys aus Deutschland in 2007	146
Abb. 50: Umsatz TV-Geräte 2004-2008 (in Mio. Euro)	152
Abb. 51: Globale Marktentwicklung von TV-Geräten	153
Abb. 52: Weltweite Marktanteile LCD-Bildschirme 2007	155
Abb. 53: Weltweite Marktanteile Notebookhersteller 2007	155
Abb. 54: Zusammensetzung der Sperrmüllsammlung in Wuppertal	157
Abb. 55: Anzahl optierte öRE für Sammelgruppe 3	158
Abb. 56: Anfragen nach gebrauchten Bildschirmen auf Internetplattformen	160
Abb. 57: Schematische Darstellung CRT-Recycling.....	161
Abb. 58: Dynamische Simulation des Anfalls von EOL-CRT-Geräten.....	163
Abb. 59: Kostenstruktur für das Recycling von LCD-Geräten in Österreich, 2008	165
Abb. 60: Verwertungskosten für Bildschirme in EU-Mitgliedsstaaten	166
Abb. 61: PGM-Nachfrage für die Produktion von Bildschirmen für Deutschland 2008 in Gramm	167
Abb. 62: Maßnahmen-Portfolio	171
Abb. 63: Konzept eines Zertifikatesystems für den Sekundärmetalleinsatz in Produkten.....	177
Abb. 64: Plakatkampagne für Handyrücknahmesysteme in Australien	179
Abb. 65: Bildschirm-Sammlung in Containern	185
Abb. 66: Demontagefreundliches Design bei CRT-Geräten am Beispiel der Kunststoffteile.....	187
Abb. 67: Geöffneter Übersee-Container in Lagos mit exportierten Bildschirmen	193

Tabellen

Tab. 1: Anwendungsfelder und technische Funktionen	17
Tab. 2: Entwicklung des globalen Verbrauchs von Platin, Palladium und Rhodium bezogen auf unterschiedliche Anwendungsfelder (2008 bis 2010) in Tonnen	19
Tab. 3: Vergleich der Umweltauswirkungen zwischen primären und recyceltem Platin	23
Tab. 4: Deckungsquote des Platinbedarfs durch Recycling nach Regionen in t	24
Tab. 5: Fahrzeuglöschungen nach Motortyp, -leistung und PGM-Gehalt	33
Tab. 6: Gebrauchtwagen-Exporte in andere EU-Staaten: REGINA-Statistik – Mitteilungen an das KBA über ehemals in Deutschland zugelassene Fahrzeuge	41
Tab. 7: Gebrauchtwagen-Exporte in Nicht-EU-Staaten entsprechend der Außenhandelsstatistik, PKW und Wohnmobile mit Otto- und Dieselmotor	43
Tab. 8: Systematik der EU Außenhandelsstatistik für die Klassifizierung von Fahrzeugen	44
Tab. 9: Top 10 Export von Gebrauchtwagen aus der EU27 in Nicht-EU-Exportländer in 2007	45
Tab. 10: Vergleich der außereuropäischen Im- u. Exporte von Gebrauchtwagen-PKW in 2002 und 2007	46
Tab. 11: Zahl der leichten Automobile im Privatbesitz pro 1.000 Einwohner (zum Jahresende; in Stück)	52
Tab. 12: Durchschnittsalter des Automobilbestands in Russland nach Regionen	53
Tab. 13: Durchschnittsalter des Fahrzeugbestands nach Marken (2009)	55
Tab. 14: Aus Deutschland exportierte und in Polen wieder zugelassene Fahrzeuge und ihr Anteil an den Neuregistrierungen	66
Tab. 15: Auszahlungen aus dem "National Fund for Environmental Protection and Water Management" an Unternehmen und Kommunen	69
Tab. 16: Eckdaten des Altfahrzeuganfalls und der –verwertung in Polen, 2006 und 2007	70
Tab. 17: Fahrzeugbestand in baltischen Ländern in 2009	72
Tab. 18: Eckdaten der Altfahrzeugverwertung in den baltischen Staaten 2008	73
Tab. 19: Einflussfaktoren auf das PGM-Potenzial als Katalysatoren	80
Tab. 19: Zusammenhänge zwischen der Entwicklung Fahrzeugflotten und dem PGM-Recycling	81
Tab. 21: Aufgaben und Instrumente einer Transferpolitik zu Verbesserung der PGM-Rückgewinnung aus Autokatalysatoren	95

Tab. 22: Einsatzmengen an Palladium weltweit (in kg), netto (Brutto minus Recycling)	102
Tab. 23: Globaler Rohstoffbedarf für miniaturisierte Kondensatoren, in Tonnen.....	104
Tab. 24: Anteilige ökologische Belastungen durch Gold, Silber und Palladium in verschiedenen Elektronikgeräten	105
Tab. 25: Gehalte und Rückgewinnungsraten von Edelmetallen aus Leiterplatten durch Demontage bzw. mechanische Aufbereitung	107
Tab. 26: Umweltbelastungspotenziale in der Primär- u. Sekundärgewinnung von Platingruppenmetallen	109
Tab. 27: Mengenabschätzungen für Export-Quellen für gebrauchte Elektrogeräte und EAG aus Deutschland	112
Tab. 28: Ankaufspreise für eine Tonne Leiterplatten-Schrott 2006	117
Tab. 29: Vorgegebene Verwertungsquoten im ElektroG	120
Tab. 30: Flows of sWEEE (tonnes) and flows of gold and palladium (kg) associated with sWEEE in Germany, 2007.....	123
Tab. 31: In Verkehr gebrachte, gesammelte und verwertete Mengen an Elektro- bzw. Elektroaltgeräten in Deutschland im Jahr 2006 in t	125
Tab. 32: Materialzusammensetzung von Mobilfunktelefonen, g/kg	129
Tab. 33: Weltweite Handyverkäufe in Mio. Stück und Marktanteile in Prozent in 2009.....	134
Tab. 34: Zusammensetzung gemischter Sammelgruppen in Deutschland	143
Tab. 35: Exporte von neuen und gebrauchten Handys aus Deutschland außerhalb der EU in 2008	147
Tab. 36: Kumuliertes, globales Recyclingpotenzial in Handys 1997-2008, in Tonnen	148
Tab. 37: Verluste in der Kreislaufführung von PGM in Mobiltelefonen	149
Tab. 38: PGM-Inhalte pro Stück in verschiedenen Bildschirmtypen nach UNU 2008	150
Tab. 39: PGM-Inhalte pro Stück in verschiedenen Bildschirmtypen nach Chancereel 2010.....	151
Tab. 40: Entwicklung der Neuverkäufe für Computerbildschirme in der EU in Mio. Stück	153
Tab. 41: Verkaufszahlen für Bildschirme in Deutschland 2005-2008 (in 1.000 Stück).....	153
Tab. 42: Zusammensetzung gemischter Sammelgruppen in Deutschland	157
Tab. 43: Bildschirme: Exportmengen in Stück für einzelne Zielländer nach DESTATIS und ZAPP (Bezugsjahr 2008, in t)	159
Tab. 44: Kostenstruktur für das Recycling von Fernsehern 2005, EU-Durchschnittswerte	164

Tab. 45: Verluste in der Kreislaufführung von PGM in Bildschirmen	168
Tab. 46: EPR-Umsetzung	172

Abkürzungen

Autokat	Autoabgaskatalysator
BRIC	Brasilien, Russland, Indien und China
CEC	Central and Eastern European Countries
CRT	Cathode Ray Tube
EAG	Elektroaltgeräte
ear	stiftung elektro-altgeräte register
EEE	Electrical (and electronics) engineering
ElektroG	Elektro- und Elektronikgerätegesetz
ELV	End-of-life-Vehicles
EPR	Extended Producer responsibility
FORS	Forum Recyklingu Samochodów (Polen)
GKat	Geregelte Katalysatoren
IKT	Informations- und Kommunikationstechnologien
LCD	Liquid Crystal Display
MLCC	Multi Layer Ceramic Capacitor
Pd	Palladium
PGM	Platin-Gruppen-Metalle
PKW	Personenkraftwagen
Pt	Platin
RFID	Radio Frequency Identification Device
Rh	Rhodium
TFT	Thin-film Transistor
UE	Unterhaltungselektronik
WEEE	Waste Electrical and Electronic Equipment

1 Einleitung

Der Einsatz von Platingruppenmetallen (PGM) mit den Hauptvertretern Platin (Pt), Palladium (Pd) und Rhodium (Rh) in technologieorientierten Anwendungen nimmt weltweit weiter zu. Treibende Faktoren sind die wachsende Nachfrage aus der Industrie, insbesondere aus den Anwendungsbereichen Autoabgaskatalysatoren und Elektro(nik)geräte (EEE). Mit diesen Anwendungen wächst gleichzeitig das sekundäre Rohstoffpotenzial, das nach der Nutzungsphase wieder zurück gewonnen werden könnte. Aus ressourcen- und umweltpolitischer Perspektive kann das PGM-Recycling einen wichtigen Beitrag zur Rohstoffsicherheit, zur Ressourcenschonung und Umweltentlastung leisten (vgl. u.a. Hagelüken/Buchert/Stahl 2005, Gordon/Bertram/Graedel, 2006, Saurat/Bringe zu 2008).

Die bestehenden internationalen räumlichen Verflechtungen zwischen den Produktionsstandorten, produktbezogenen Zielmärkten und deren Ressourcenpotenzialen ist in der Ressourcenpolitik ein noch wenig beachtetes Thema. Die produktbezogenen Zielmärkte werden dabei zu neuen Lagerstätten für ein Urban Mining. Hierbei ergeben sich zusätzliche Herausforderung für die Rückgewinnung und die Redistribution. Im Rahmen der Sekundärrohstoffwirtschaft entstehen neue Produktions- und Konsumtionsräume, die sich je nach Produktbereich erheblich voneinander unterscheiden. Inwieweit hieraus Konsequenzen für den räumlichen Zuschnitt eines internationalen Stoffstrommanagements zu ziehen sind, wird im Weiteren zu diskutieren sein.

Vor diesem Hintergrund bestand im MaRes-Teilprojekt „Weltweite Wiedergewinnung von Platingruppenmetallen (PGM)“ die Aufgabe, für ausgewählte Handlungsfelder mögliche Verlustquellen und Defizite im internationalen Stoffstrommanagement zu identifizieren und hierauf aufbauend Vorschläge für eine verbesserte internationale Kreislaufführung von PGM zu entwickeln. Der Schwerpunkt der Untersuchung lag hierbei in den Handlungsfeldern Autoabgaskatalysatoren und Konsumgüterelektronik (Mobiltelefone und Flachbildschirme). Hierbei wurden insbesondere die internationalen Bedingungen für ein verbessertes Stoffstrommanagement anhand von Fallbeispielen untersucht. Auf dieser Basis wurden Maßnahmen vorgeschlagen, die dazu beitragen können, dass auf **internationaler** Ebene bestehende Steuerungsdefizit hinsichtlich der Kreislaufführung beseitigt werden.

Der Verlauf des Projektes war durch drei Arbeitsphasen geprägt:

- Phase I: Identifizierung der potenziell problematischen Exportströme und signifikanten PGM-Verluste (auf der Basis der verschiedenen vorliegenden Studien). Die Erfassung der Stoffströme erfolgt hierbei differenziert nach Produktgruppen und Zielländern.

- Phase II: Vertiefende, akteursbezogene Untersuchung ausgewählter Exportströme und Anwendungsbereiche. Identifizierung signifikanter Potenziale bezüglich Vermeidung, Substitution durch ressourcenschonende Produktion und Kreislaufführung.
- Phase III: Ableitung und Abstimmung von Strategien und Maßnahmen zur Vermeidung, Substitution und Verbesserung der internationalen Kreislaufführung. Bewertung vorrangig zu verfolgender Optionen.

Bei der Bearbeitung der Aufgabenstellung wurde auf einen Methodenmix zurückgegriffen, der u.a. folgende Elemente beinhaltet:

- Phase 1: vor allem Literatur- und Datenauswertung und Desktop-Recherchen.
- Phase 2: Auswertung statistischer Analysen, Durchführung eigener Berechnungen zur Bestimmung der exportbezogenen Stoffströme, vertiefende Analysen mittels Expertengesprächen, Organisation und Durchführung eines Workshops am 24.4.2009 in Berlin als Stakeholder-Dialog zur Diskussion einer „Roadmap“ zum Recycling von Autokatalysatoren.
- Phase 3: Teilnahme an nationalen und internationalen Fachveranstaltungen, die sich mit dem Stoffstrommanagement in den ausgewählten Handlungsfeldern befassen. Abstimmung der Maßnahmenvorschläge mit verschiedenen Experten, auch in den Zielländern der Exporte von PGM-haltigen Produkten. Auswahl und Bewertung von Maßnahmen durch das Projektteam des Wuppertal Instituts.

Die Auswahl der beiden Anwendungsfelder „Autoabgaskatalysatoren“ und „Konsumgüterelektronik“ wurde in Absprache mit der Fachbegleitung des Umweltbundesamtes am Ende der Phase 1 getroffen. Hierbei wurden folgende Kriterien berücksichtigt:

- Quantitative Bedeutung der PGM-Nutzung
- Wachstum der Nachfrage
- Potenzialverluste durch Exporte
- Ineffizienzen in der internationalen Recyclingkette

Die Ergebnisdarstellung in diesem Endbericht orientiert sich nun im wesentlichen an den beiden ausgewählten Untersuchungsfeldern und macht auf dieser Basis dann Vorschläge für einen internationalen Governance-Ansatz zur Steuerung der PGM-Stoffströme.

Zunächst wird in Kapitel 1 ein allgemeiner Überblick über die weltweiten Rahmenbedingungen der PGM-Förderung und der Entwicklung des PGM-Verbrauchs in einzelnen Anwendungsfeldern gegeben. Hieran schließt sich in Kapitel 2 eine vertiefende Analyse des Anwendungsfeldes „Autoabgaskatalysatoren“ an. Hierbei werden auch

die Ergebnisse einer vertiefenden, akteursbezogenen Untersuchung der Länder Russland und Polen sowie der baltischen Staaten vorgestellt.¹ In Kapitel 3 erfolgt eine Analyse des Anwendungsfeldes Konsumgüterelektronik (insbesondere Mobiltelefone und Flachbildschirme). Für beide Bereiche wurden Maßnahmen vorgeschlagen, um insbesondere Verluste zu minimieren und das Recycling insgesamt zu verbessern.² Die Maßnahmen im Bereich Autoabgaskatalysatoren wurden in einer Roadmap zusammengefasst und mit Akteuren aus Industrie, Wissenschaft und Verwaltung auf einen Workshop angestimmt. Kapitel 5 fasst die Ergebnisse aus regulationstheoretischer Sicht zusammen und gibt erste Hinweise für den weiteren Forschungs- und Handlungsbedarf.

¹ Dies Auswahl dieser Staaten begründet sich zum einen mit ihrer besonderen Bedeutung für das PGM-Recycling im Bereich der Autoabgaskatalysatoren, zum anderen mit dem Zugang zu Experten und Informationen.

² Einige der hier vorgestellten Ergebnisse wurden im MaRess-Arbeitsbereich 3.5 aufgegriffen und weiter konkretisiert, insbesondere was die weitere Ausgestaltung von Anreizinstrumenten auf der internationalen Ebene betrifft (Wilts et al 2010).

2 Rahmenbedingungen für die internationale Stoffstromsteuerung

2.1 Strukturen der PGM-Primärförderung

In der Regel werden die Platingruppenmetalle als Nebenprodukt von Edel- (Gold, Silber) und Nichtedelmetallen (Kupfer, Nickel) gewonnen. Allein in Südafrika (Transvaal) wird in einem Bergwerk reines metallisches Platin abgebaut.

Es gibt drei Hauptabbaugebiete für die Platingruppenmetalle:

- In Südafrika sind als die größten Produzenten Anglo Platinum, Impala Platinum, Lonmin, Northam Platinum, Aquarius Platinum, ARM Platinum und Southern Platinum zu nennen. Zusammen produzieren sie etwa 64 % der weltweiten Gesamtfördermenge.
- In Nordsibirien baut Norilsk Nickel neben Kobalt, Nickel und Kupfer 95 % der russischen Platinmetalle ab. Das entspricht etwa 29 % der globalen Gesamtproduktion.
- Auf dem nordamerikanischen Kontinent produziert Stillwater Palladium (Montana, USA), Inco und Falconbridge produzieren in Sudbury (Kanada) und North American Palladium in Lac des Iles (ebenfalls Kanada). Zusammen haben sie einen Weltmarktanteil von nur ca. 6 %.

Einen Überblick gibt die nachfolgende Abbildung.

Abb. 1: Platinmetallvorkommen und platinmetallproduzierende Länder



Quelle: Reller 2010

Versorgungssicherheit und Preisstabilität sind daher von den Förderkapazitäten in Russland und Südafrika abhängig und werden stark von der politischen und wirtschaftlichen Situation in diesen Ländern beeinflusst (vgl. hierzu auch das nachfolgende Kapitel).

Das weltweite Platin-Angebot (primär und sekundär) hat sich in 2007 auf 260 Tonnen belaufen. Aufgrund der langen Vorlaufzeiten für die Planung und Erschließung einer Mine sowie der hohen Anlaufkosten ist eine kurzfristige Ausweitung der Förderung nicht möglich. Eine Steigerung der Förderung erfolgte in den letzten Jahren immer in kleinen Schritten und betrug im Zeitraum von 1998 bis 2007 durchschnittlich für Platin

+2,3 %, für Palladium +0,2 % und für Rhodium +6,1 %.³

Die PGM-Reserven, also die zu ökonomisch rentablen Konditionen abbaubaren, identifizierten Vorkommen, werden auf etwa 71.000 t geschätzt, die gesamten bekannten Vorkommen betragen nur unwesentlich mehr, 80.000 t. Die statische Reichweite beim aktuellen Nachfrageniveau als Hauptindikator für die Verfügbarkeit nicht erneuerbarer Rohstoffe beträgt damit über 150 Jahre (vgl. USGS 2008, 127).

2.2 Kritikalität der Rohstoffversorgung

Aufgrund dieser Strukturen hat in Deutschland und Europa eine Diskussion über die Versorgungssicherheit im Bereich der Technologiemetalle (vgl. Buchert; Schüler; Bleher 2008)⁴, wozu auch die Platingruppenmetalle gezählt werden, eingesetzt (DG ENTR 2010, Hagelüken 2010).

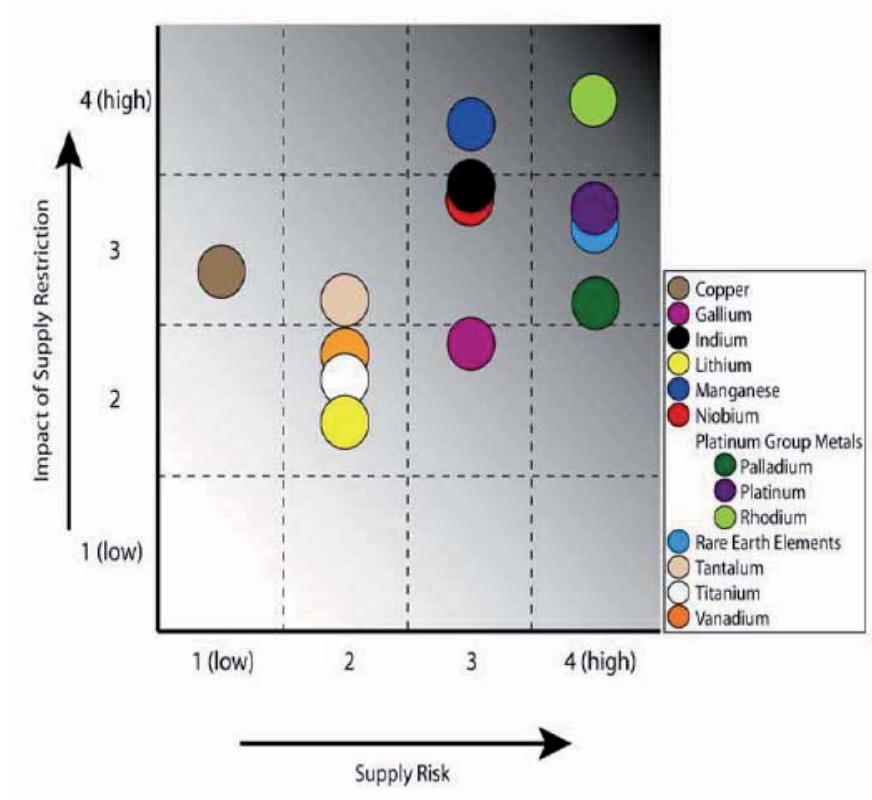
Die Versorgungssicherheit mit PGM kann aus drei Gründen als besonders kritisch eingestuft werden: PGM sind strategische Rohstoffe für die Modernisierung der Volkswirtschaften in der ganzen Welt. Sie unterliegen hinsichtlich ihrer Verfügbarkeit erheblichen Restriktionen. Der stetig steigenden Nachfrage nach PGM stehen begrenzte Minenkapazitäten in wenigen Ländern (Russland, Südafrika) gegenüber. So existieren erhebliche Probleme bei der Ausdehnung der Primärproduktion, die in Russland an die Nickelproduktion gekoppelt ist und in Südafrika immer wieder durch die mangelnde Energieversorgung beeinträchtigt wird. Der Export von PGM erfolgt in Russland über die staatliche Handelsgesellschaft Almazjuvelirexport. Die Höhe der Exporte wird jährlich per Regierungserlass genehmigt. Verzögerungen bei der Erteilung von Exportgenehmigungen führten in den vergangenen Jahren wiederholt zu starken Angebotsveränderungen und entsprechenden Preisschwankungen für PGM auf dem Weltmarkt.

Und es gibt derzeit in den Hauptanwendungsfeldern wie den Autokats nur geringe Substitutionsmöglichkeiten. Bewertungen hinsichtlich der Verfügbarkeit kommen zu dem Ergebnis, dass hier erhebliche Risikofaktoren vorliegen (siehe auch die nachfolgende Abb. 2)

³ Eigene Berechnungen auf Basis der Angaben aus: Johnson Matthey, Platinum Yearbook 2007, S. 52, S. 54 und S. 56

⁴ Dies sind lt. Rohstoffinitiative der EU (EU 2008: 17) folgende Metalle: Antimon, Chrom, Germanium, Gallium, Indium, Kobalt, Lithium, Magnesium, Mangan, Molybdän, Niob, Platin (PGM), Palladium, Rhodium, Seltene Erden, Rhenium, Tantal, Titanium, Wolfram und Vanadium. Diese Stoffe sind nicht allein für High-tech-Anwendungen allgemein bedeutsam, sondern insbesondere auch für zunehmend bedeutsame Energieerzeugungs- und -umwandlungstechniken (Hybridantrieb, Photovoltaik, Windenergie, Brennstoffzellen, Wasserstoffnutzung).

Abb. 2: Bewertung der Kritikalität



Quelle: Reller 2010

Die Kritikalität der Rohstoffversorgung vor allem mit Technologiemetallen hat insbesondere auf europäischer Ebene zu verschiedenen Initiativen geführt. So hat die EU-Kommission im November 2008 eine Rohstoffinitiative zur Sicherung der Versorgung Europas mit den für Wachstum und Beschäftigung notwendigen Gütern gestartet (KOM 699, 2008). Diese verfolgt drei Ziele:

- Gewährleistung des diskriminierungsfreien Zugangs zu den auf dem Weltmarkt gehandelten Rohstoffen,
- Senkung des Primärrohstoffverbrauchs in der EU und
- Sicherung der Versorgung mit Rohstoffen aus heimischen Quellen.

Als heimische Quellen werden in der Strategie insbesondere die Recyclingpotenziale hervorgehoben. Ein höherer Recyclinganteil zur Versorgung der Automobilindustrie mit PGM könnte sich auch positiv auf die Preisentwicklung in den internationalen Rohstoffmärkten auswirken. Somit besteht aus volkswirtschaftlicher Sicht ein erheblicher, strategischer Handlungsbedarf zur Erschließung der sekundären Rohstoffpotenziale durch eine verbesserte Kreislaufführung, um die steigende Nachfrage befriedigen zu können.

2.3 Hauptanwendungsfelder und Trends in der Nachfrageentwicklung

2.3.1 Anwendungsfelder und technische Funktionen

Da die chemischen Eigenschaften der beiden Metalle Platin und Palladium sehr ähnlich sind, finden sie weitestgehend in gleichen Bereichen Anwendung. Wie die nachfolgende Tabelle zeigt, ist die Einsatzbreite enorm und mit vielfältigen technischen Funktionen in unterschiedlichen Anwendungsfeldern verbunden.

Tab. 1: Anwendungsfelder und technische Funktionen

Anwendungsfeld	Pt	Pd	Rh	Technische Funktion
Automobilproduktion	X	X	x	Oxidation von giftigem Kohlenmonoxid zu Kohlendioxid, Reduktion der Stickoxide zu Stickstoff und Oxidation der Kohlenwasserstoffe zu Kohlendioxid. Anwendung auch in Lambda-Sonden und in der Autoelektronik
Großtechnische, industrielle Prozesse	X	X	X	Hauptsächlich katalysiert Platin Hydrierungs-, Dehydrierungs- und Oxidationsprozesse. So wird mit Hilfe des Platins aus Ammoniak Stickstoffmonoxid gewonnen. Des Weiteren findet Platin als Katalysator in der Öl-Raffinerie, der Petrochemie und der Chemieindustrie (Herstellung von Terephthal- Salpetersäure, Polymeren) Verwendung, Aufbereitung von Altöl, Behandlung von Emissionen in der Kraftwerkstechnik.
Elektrogeräte	X	X	x	Palladium und Palladium Legierungen finden Anwendung in capacitors, connectors, and electrical contacts. components in capacitors and resistors (palladium), Platin in computer storage disks, electrodes, fuel cells, and in thermocouples. Ruthium in flat-screen monitors and mobile phones
Glasindustrie	X		x	Betriebsausrüstungen und Spezial-Werkzeuge wg. der Hitzebeständigkeit Endprodukte der Glasindustrie (z.B. bei Spezialgläsern, optischen Gläsern, LCDs)
Schmuck	X	X		Platin: Härte des Materials, Beständigkeit des Glanzes, symbolisiert Reichtum, insb. in China und Japan. Palladium als Legierungskomponente zur Herstellung von Weißgold
Zahntechnik		X		Herstellung vor allem von Kronen und Implantaten, in Verbindung mit anderen Edelmetallen widerstandsfähig und dauerhaft
Medizin, Medizintechnik	X			Als Therapeutikum in der Onkologie, Verlangsamt die Zellteilung, Injektionsnadeln, Verwendung in Herzschrittmachern und anderen Implantaten wg. der Bio-verträglichkeit.

Quelle: Eigene Zusammenstellung auf der Basis der Angaben in Saurat/Bringezu 2008, Wilburn/Bleiwass 2004 und Johnson Matthey 2010, 20 ff. Zu Feldern ohne x lagen keine Angaben vor.

Ein weiterer Markt mit einem enormen potentiellen Platin-Bedarf stellt der Bereich der Brennstoffzellen dar. Nach Angaben von Angerer et al. 2009, könnte sich bis zum Jahr 2030 hier eine Nachfrage von bis zu 340 t ergeben, was alleine für diesen Sektor das gesamte Platinangebot im Jahr 2006 um etwa 50% übersteigen würde. Für die Brennstoffzellen ist Platin als Katalysator bei der kalten Verbrennung von Sauerstoff und Wasserstoff in der Polymer-Elektrolytmembran beim bisherigen Stand der Technik auch durch keine anderen Materialien substituierbar (vgl. ebd., 295). Eine zunehmende Bedeutung erlangen auch Anwendungsfelder wie die Photovoltaik und die Elektromobilität (vgl. Buchert et al 2009, Hagelüken 2010).

2.3.2 Einflussfaktoren und Trends des PGM-Verbrauchs

Nachfolgend werden zunächst einige Einflussfaktoren auf die weitere Mengenentwicklung in den Hauptanwendungsgebieten beschrieben. Die Betrachtungsebene hierfür ist global, um dem internationalen Ansatz des Projektes Rechnung zu tragen.

Der Einsatz von Platingruppenmetallen (PGM) mit den Hauptvertretern Platin, Palladium und Rhodium in technologieorientierten Anwendungen nimmt weltweit weiter zu. Knapp 50 Prozent der (Primär- und Sekundär-)Produktion von Platin, Palladium und Rhodium finden Verwendung in Autoabgaskatalysatoren. Weitere wichtige Anwendungsgebiete sind Elektronik, Schmuck und Prozesskatalysatoren in der Chemie und Erdölraffination.⁵ Die PGM-Nachfrage wird durch unterschiedliche marktliche und technische Faktoren beeinflusst. Nach den Umsatzeinbrüchen durch die Wirtschafts- und Finanzkrise 2009 hat sich im Jahre 2010 wieder ein mengenbezogenes Wachstum der Primärproduktion eingestellt, welche insbesondere die Nachfrage aus dem Automobilbereich und der Konsumgüterelektronik getrieben wird.

Der PGM Verbrauch in den verschiedenen Nachfragesektoren und deren Entwicklung in den letzten 3 Jahren ist in Tab. 2 dargestellt. Mit diesen Anwendungen wächst gleichzeitig das sekundäre Rohstoffpotenzial, das nach der Nutzungsphase theoretisch wieder zurück gewonnen werden könnte. Eine differenzierte Betrachtung für die Untergruppen Platin, Palladium erlaubt es, signifikante Wachstumsfelder zu identifizieren, die in der Tabelle besonders hervorgehoben werden.

⁵ Siehe hierzu im Detail auch die Tab. 2

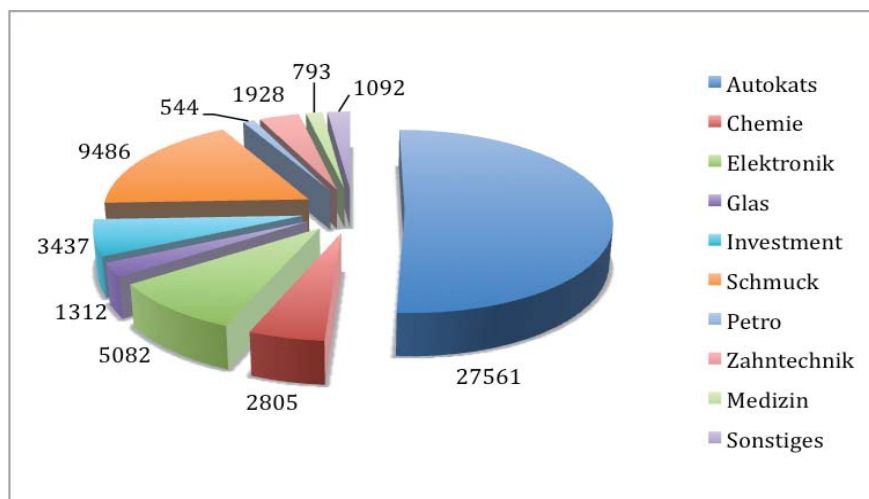
Tab. 2: Entwicklung des globalen Verbrauchs von Platin, Palladium und Rhodium bezogen auf unterschiedliche Anwendungsfelder (2008 bis 2010) in Tonnen

Platin	2008	2009	2010	Palladium	2008	2009	2010	Rhodium	2008	2009	2010
Autokats	103,6	61,9	84,6	Autokats	126,5	114,8	146	Autokats	21,7	17,5	20,6
Elektro	6,5	5,3	6,3	Elektro	38,8	36,0	39,8	Elektro	0,08	0,08	0,1
Invest	15,7	18,7	12,3	Invest	11,9	17,7	18,9				
Schmuck	58,4	79,6	68,6	Schmuck	27,9	21,9	17,8				
Glas	8,9	0,2	10,3					Glas	0,9	0,5	1,6
Medizin	6,9	7,0	7,2	Dental	17,7	18,0	17,5				
Chemie	11,3	8,2	12,7	Chemie	9,9	9,2	10,9	Chemie	1,9	1,5	1,8
Andere	15,0	11,3	12,0	Andere	2,1	1,9	2,2	Andere	0,6	0,5	0,5
Verbrauch	226,5	192,6	214,3	Verbrauch	235,0	219,7	253,4	Verbrauch	25,4	20,2	24,8
Recycling	51,8	39,8	52,1	Recycling	45,7	40,5	52,3	Recycling	6,4	5,3	6,7
Net.-Verbr.	174,6	152,8	162,1	Net.-Verbr.	189,2	179,1	201,1	Net.-Verbr.	18,9	14,9	18,0
Lager	6,2	18,0	8,2	Lager	18,0	22,1	1,2	Lager			

Quelle: Eigene Zusammenstellung und Berechnung in t auf der Basis der Angaben in Johnson Matthey 2010. Die Werte für 2010 sind Schätzwerte auf der Basis der ersten 9 Monate, Wachstumswerte in rot.

Die weltweite Bruttonachfrage nach PGM in 2010 haben wir zur besseren Übersicht auch noch einmal grafisch aufbereitet.

Abb. 3: Weltweite Brutto-PGM-Nachfrage nach Sektoren 2010 (in 1000 Tonnen)



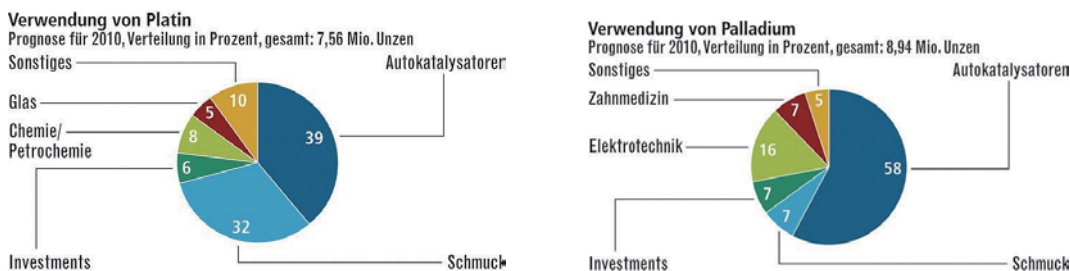
Quelle: Johnson Matthey 2010, eigene Berechnungen.

Trotz gestiegener Preise für PGM ist die Nachfrage für den Sektor Autokatalysator in den letzten Jahren weltweit um bis zu 10% gestiegen, wofür vor allem die Nachfrage aus China und anderen Schwellenländern gesorgt hat.

Diese zusammenfassende Betrachtung darf allerdings nicht darüber hinwegtäuschen, dass in den Nachfragestrukturen von Platin und Palladium erhebliche Unterschiede bestehen. Wie die nachfolgende Grafiken zeigen, ist der Marktanteil der Autoindustrie beim Platin deutlich niedriger als beim Palladium und beträgt etwa 40% der Gesamtnachfrage. Davon wird über die Hälfte in Europa - vorrangig in Dieselmotorkatalysatoren (90 %) – eingesetzt (vgl. Johnson Matthey 2010).

Bei der Palladium-Nachfrage hat die Automobilindustrie eine sehr dominante Rolle (60 %, 5,1 Mio. Unzen = ca. 200t), an zweiter Stelle gewinnen hier die elektronischen Anwendungen an Bedeutung. Bei **Rhodium** ist der Anteil sogar noch höher (ca. 80%, 0,88 Mio. Unzen oder ca. 25 t, vgl. Johnson Matthey 2008, 8).

Abb. 4: Verwendung von Platin und Palladium nach Anwendungsfeldern



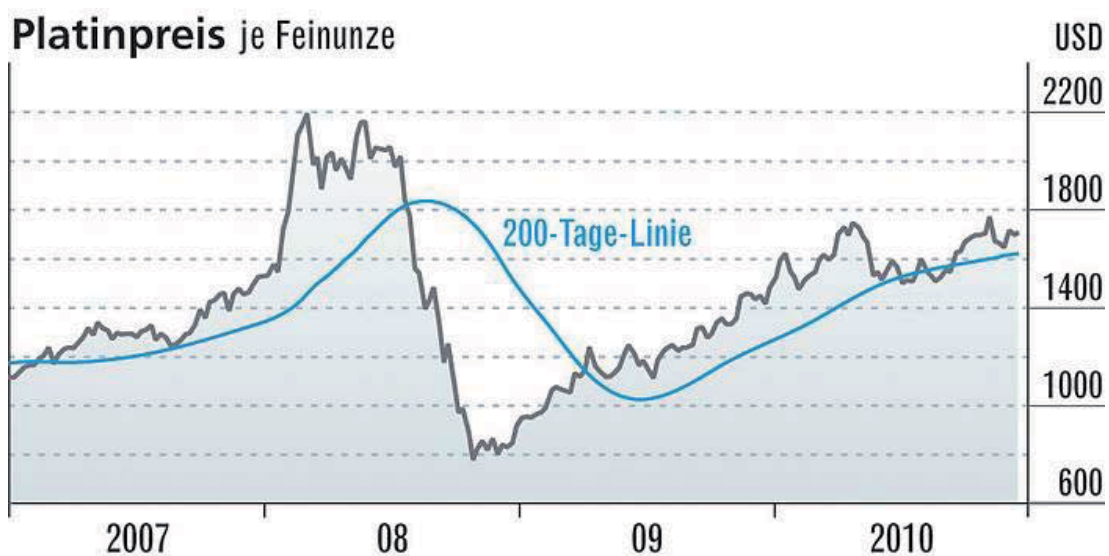
Quelle: Focus-Money-Online 2011a+b

Ein wichtiger Wachstumsbereich des Palladium-Einsatzes sind beispielsweise Vielschichtkondensatoren (MLCC = multi layer ceramic capacitors), die in großen Mengen in Halbleiterbauelementen verwendet werden, die in Mobiltelefonen und Empfangsgeräten zum Einsatz kommen. Dabei haben in den letzten Jahren die Miniaturisierung dieser Bauteile und die Substitution durch Nickel und Kupfer die eingesetzte Menge pro Bauteil stark gesenkt, trotzdem hat das enorme Wachstum elektronischer Anwendungen diese Effekte überwogen und zu einer insgesamt stark wachsenden Nachfrage in diesem Segment geführt, das insgesamt etwa ein Fünftel der gesamten Palladium-Produktion beansprucht (Johnson Matthey 2008, weitere Details hierzu in Kap. 4). Dabei ist der Anteil einzelner Produktgruppen am Wachstum der Elektronikanwendungen sehr unterschiedlich. Derzeit wächst dieser Bereich durchschnittlich jährlich mit etwa 4-5 %, einzelne Produktgruppen wie LCD-Bildschirme aber bis zu 40 %.

Über Vorliefererverflechtungen ist der LCD-Bereich eng mit der Spezialglasindustrie verbunden, die ebenfalls verstärkt PGM nachfragt. In den letzten Jahren wurden hier vor allem neue Produktionskapazitäten in Asien aufgebaut, mit dem Effekt, dass es in den dortigen Märkten zu einem deutlichen Anstieg der Nachfrage, sowohl nach Platin, wie auch nach Rhodium gekommen ist.

Die verstärkte Nachfrage aus den Hauptverbrauchsektoren hat nach der Wirtschaftskrise 2008/2009 zu einem enormen Preisanstieg an den internationalen Rohstoffbörsen geführt. Allerdings werden die Höchstwerte aus dem Jahr 2008 noch nicht wieder erreicht, wie die nachfolgende Abbildungen für Platin und Palladium zeigen.

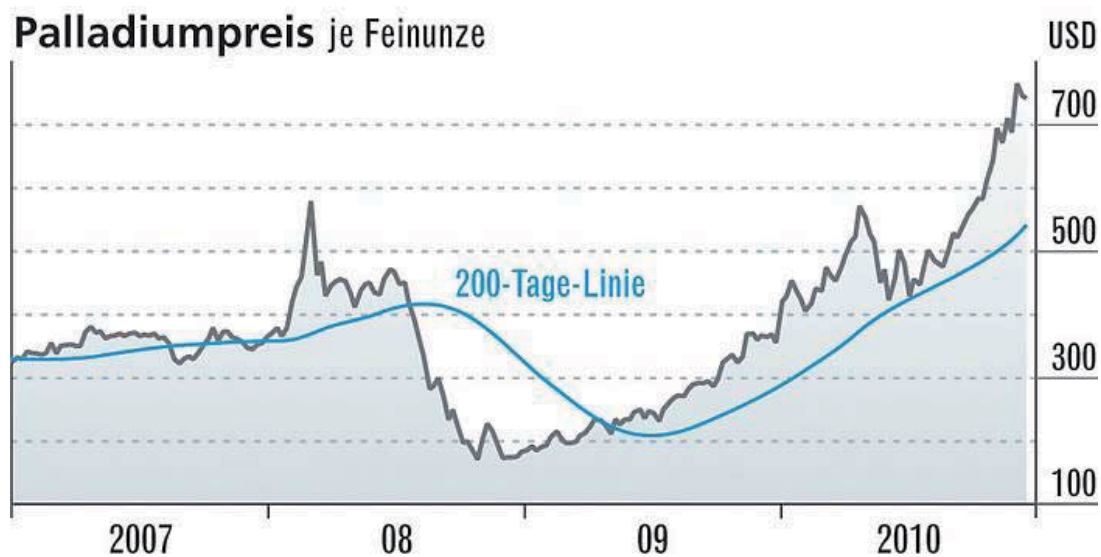
Abb. 5: Platinpreis je Feinunze 2007 - 2010



Quelle: FOCUS-MONEY-Online 2011a, nach Thomson Reuters Datastream

Auch der Palladium-Preis ist seit der Wirtschaftskrise erheblich gestiegen. Mit 800 Dollar je Feinunze wurde 2010 der höchste Stand seit März 2001 erreicht. Stärker als beim Platin wirkt hier auf die Preisentwicklung die Nachfrage aus der Automobilindustrie ein, da fast 70 % der Platinproduktion in die Automobilproduktion gehen. Da Platin und Palladium ähnliche Eigenschaften haben, wirkt sich der Beschaffungspreis auf die Beladungen in den Autokats aus. Ist der Palladium-Preis deutlich niedriger als bei Platin, so wird – wenn dies technisch vertretbar ist – auch deutlich mehr Palladium eingesetzt.

Abb. 6: Palladiumpreis je Feinunze 2007 - 2010



Quelle: Focus-Money-Online 2011b, nach Thomson Reuters Datastream

Steigende Preise für Platin und Palladium machen diese Edelmetalle auch für Anleger attraktiv. So absorbieren Exchange Traded Commodities (ETCs) große Mengen der Metalle. Nach Schätzung von Analysten lagen 2010 knapp eine Million Unzen Platin und 1,6 Millionen Unzen Palladium in den Tresoren der Emittenten (vgl. Focus Money Nr. 18, 2010).

2.4 Bedeutung, Entwicklung und Probleme des PGM-Recyclings

2.4.1 Umweltpolitische Relevanz

Grundsätzlich ist die Primärgewinnung von PGM aufgrund der geringen Erzkonzentration und des aufwändigen Gewinnungsprozesses mit großen Umweltbelastungen verbunden. Demgegenüber ist die Rückgewinnung des PGMs aus Altprodukten wesentlich umweltfreundlicher. Betrachtet man die gesamte Prozesskette der Platingewinnung, verursacht jede Tonne primäres Platin einen ökologischen Rucksack von über 680.000t. Beim Recycling von Platin liegt der Ressourcenverbrauch um den Faktor 78 niedriger (vgl. Tab. 3).

Tab. 3: Vergleich der Umweltauswirkungen zwischen primären und recyceltem Platin

	TMR in t/t
Primärproduktion	683,564.91
Sekundärproduktion	8,738,82

Quelle: Saurat/ Bringezu 2008

2.4.2 Defizite im Stoffstrommanagement

Trotz der ökologischen und ökonomischen Notwendigkeit eines verstärkten Recyclings ist es bisher vor allem in Konsumgüterbezogenen Anwendungen wie Autoabgaskatalysatoren und Elektronischen Gütern nicht gelungen, die Recyclingpotenziale vollständig zu erschließen und dissipative Verluste zu vermeiden.

Für den Bereich der Autoabgaskatalysatoren hat Hagelüken (2007) die Verluste näher spezifiziert. Er geht davon aus, dass zwischen 1980 und 2007 weltweit knapp 3.800 Tonnen PGM eingesetzt wurden. Im gleichen Zeitraum wurden von dieser Menge lediglich rund 500 Tonnen durch das Kat-Recycling zurückgewonnen. Etwa 2300 Tonnen waren noch im Fahrzeugbestand gebunden. Es muss also davon ausgegangen werden, dass in diesem Zeitraum bereits rund 1000 Tonnen PGM, die in Autokats eingesetzt waren, bereits unwiderruflich verloren gegangen sind (alle Angaben nach Hagelüken 2007).

Die Gründe für diese Verluste liegen in erster Linie nicht im Bereich der Recyclingtechnik, denn technisch ist es möglich, PGM nahezu vollständig und ohne Qualitätsverlust zu recyceln. Die Defizite liegen vor allem im Bereich des internationalen Stoffstrommanagements und der hier vorherrschenden Regeln und Strukturen, die nicht zu einer effizienten Kreislauflführung beitragen. Signifikant sind hierbei die unterschiedlichen Praktiken in verschiedenen Anwendungsfeldern. Im Bereich industrieller Anwendungen, z.B. Industriekatalysatoren, werden Recyclingraten bis zu 90 % erreicht (vgl. Saurat/ Bringezu 2008 u. 2008a). Bei den industriellen Anwendungen werden die Prozesse in "geschlossenen Kreisläufen" gesteuert. Zwischen dem industriellen Anwender und dem Recycler bestehen in den Industrieländern langfristige Beziehungen und der Umgang mit dem rückzuführenden Material ist vertraglich geregelt.

Demgegenüber sind die Recyclingquoten im Bereich in den Open-Loop-Systemen der Konsumgüterindustrie deutlich geringer (vgl. Hagelüken 2007a sowie Hagelüken, Buchert, Ryan 2006). Die Gründe hierfür sind vielfältig:

- Die Verfügungsrechte über die Art der Nutzung und den Verkauf am Ende des Produktlebenszyklus liegen im Konsumgüterbereich bei Privatpersonen, welche nur geringe Kenntnisse über die eingesetzten Materialien haben.
- Der PGM-Anteil an einem komplexen Gesamtprodukt ist häufig sehr gering und hat bezogen auf das einzelne Produkt nur einen geringen Wert.
- In der Nutzungsphase kommt es zu zahlreichen Eigentumswechseln, die hohe Mobilität der Güter erleichtert Exporte ins Ausland, damit erhöht sich der logistische Aufwand.
- Fehlende gesetzlicher Definition zur Funktionstüchtigkeit von Gebrauchsgütern begünstigen falsch deklarierte Ausfuhren von wertstoffhaltigem Material und Komponenten.

2.4.3 Beitrag des Recyclings zur Rohstoffversorgung

Aus volkswirtschaftlicher Sicht einer gesicherten Rohstoffversorgung müssen im Kontext einer möglichen PGM-Kreislaufführung auch die Deckungsquoten des Platinbedarfs durch Recycling betrachtet werden. Im globalen Vergleich unterschiedlicher regionaler Märkte ergibt sich hierbei ein differenziertes Bild.

Tab. 4: Deckungsquote des Platinbedarfs durch Recycling nach Regionen in t

	2006		2007		
	Bedarf	Sekundär-Angebot	Bedarf	Sekundär-Angebot	Deckungs-Quote
Europa	2060	190	2080	220	10,6 %
Japan	605	35	615	35	5,7 %
Nord-Amerika	705	575	930	575	61,8 %
China	155	0	215	0	0 %
Rest	380	60	385	60	15,6 %
Gesamt	3905	860	4225	890	21,1 %

Quelle: Johnson Matthey 2008

Weltweit werden die Hälfte aller Katalysatoren in Europa produziert. Demgegenüber beträgt der europäische Anteil am Sekundärplatinaufkommen aus Kat-Recycling nur 25 %. Das Platin aus dem Recycling deckt damit in Europa nur knapp 11 % des Platinbedarfs für die Katalysatorproduktion, dagegen deckt Nordamerika durch das Katalysatoren-Recycling über 61 % seines eigenen Bedarfs. Diese Zusammenhänge ver-

weisen darauf, dass die Autoindustrie und ihre Zulieferer aus dem Bereich der Abgasreinigung ein hohes Interesse daran haben müssen, die Recyclingquoten in Europa zu steigern und die Potenziale in außereuropäischen Regionen zu erschließen.

Weltweit beträgt derzeit der Beitrag des Recyclings zur Versorgung mit Palladium bei Autoabgaskatalysatoren 2010 26 % (2006 waren es 20 %). Grundsätzlich wird aufgrund des weiteren Wachstums der weltweiten Flottenbestände und der hohen Rohstoffpreise für Platin und Palladium ein weiter steigendes PGM-Aufkommen aus dem Kat-Recycling durch Marktbeobachter prognostiziert (vgl. Magilligan et al 2011). Auch spielt eine Rolle, dass im Recycling zunehmend auf die Fahrzeugbestände der 90er Jahre zurückgegriffen werden kann, die einen höheren PGM-Anteil enthalten als die Fahrzeuge im Jahrzehnt davor.

Im Bereich der elektronischen Anwendungen stieg die Quote ebenfalls von 19 % im Jahr 2006 auf 31 % im Jahr 2010 (nach Johnson Matthey 2010, S. 36). Durch den Aufbau von Redistributionssystemen in Europa ist hier vor allem eine verbesserter Rücklauf gebrauchter Produkte erreicht worden. Auch übten die hohen Rohstoffpreise eine zusätzliche Anreizwirkung aus.

Mit der Verlagerung der Stoffpotenziale in die Schwellenländer kann diese positive Entwicklung aber wieder zum Stillstand kommen, denn den weltweit wachsenden PGM-Potenzialen im Automobilsektor und der Elektronikindustrie stehen derzeit keine erkennbaren Strategien gegenüber, leistungsfähige Recycling- und Redistributionsstrukturen auszubauen. Vor diesem Hintergrund besteht ein dringender Handlungsbedarf, Instrumente und Maßnahmen für ein international ausgerichtetes PGM-Stoffstrommanagement zu entwickeln.

Aus methodischer Sicht bleibt anzumerken, dass die durch Johnson Matthey ermittelten Quoten einen Relationswert darstellen, der den Recyclinganteil ins Verhältnis setzt zum Input aus primären Quellen. Will man diese Quote im europäischen oder nationalen steigern, so müssen insbesondere die Faktoren betrachtet werden, die am Ende des Produktlebenszyklus dazu führen, dass die Potenziale nicht erschlossen werden. Grundsätzlich kann hierbei zwischen folgenden Faktoren unterschieden werden:

- Regulatorische und institutionelle Faktoren: Gesetze, Umweltvorschriften, Recyclingquoten, Entsorgungswege, Vollzugskontrolle, Verträge zwischen den Akteuren
- Technische Faktoren: Materialdesign der Produkte, eingesetzte Recyclingtechnik, Prozessschritte zur Aufbereitung des Sekundärmaterials, Transport und Lagerung
- Räumliche Faktoren: Verlagerung der PGM-Stoffströme in andere Volkswirtschaften durch Export von Produkten (neue und gebrauchte, auch Teile von Produkten).
- Ökonomische Faktoren: Nachfrageentwicklung, Marktpreise für Altprodukte, Kosten der Aufbereitung, Anreizsysteme

3 Untersuchung des Handlungsfeldes Autoabgaskatalysatoren (Autokats)

In der nachfolgenden Literaturanalyse und Auswertungen von Statistiken werden vor allem solche Faktoren betrachtet, die das internationale PGM-Stoffstrommanagement beeinflussen. Es wird dargestellt, welche generellen Faktoren auf das PGM-Stoffstrommanagement wirken, um hieraus dann Empfehlungen für einzelne Maßnahmen und die Governance-Konzeption abzuleiten.

3.1 Ökonomische Faktoren

3.1.1 Nachfragestrukturen und Versorgungssicherheit

Das deutliche Wachstum im Bereich der Autokats und der damit verbundenen Anteilsverschiebungen im PGM-Verbrauch speist sich aus zwei Faktoren: Quantitativ aus dem stetigen Wachstum der Fahrzeugflotten, vor allem in den Schwellenländern China, Indien, Brasilien und Russland. Qualitativ insbesondere durch die verschärften gesetzlichen Anforderungen zum Emissionsschutz in den führenden Industriestaaten. Auch der steigende Anteil an Dieselfahrzeugen hat zur Folge, dass sich die PGM-Beladungen hinsichtlich des Anteils von Platin, Palladium und Rhodium weltweit verändern.

Durch das dynamische Wachstum der Fahrzeugflotten in den Schwellenländern verschieben sich weltweit die PGM-Potenziale von Europa und den USA (mit nahezu gesättigten Märkten) vor allem in die BRIC-Staaten (Brasilien, Russland, Indien, China) und nach Südostasien. Durch die Angleichung an europäische und amerikanische Emissionsstandards wird in den nächsten Jahren die Ausrüstung der Fahrzeuge mit Katalysatoren erheblich zunehmen. Aufgrund der Nachfrage stehen insbesondere deutsche Automarken in diesen Ländern hoch im Kurs, die Importe von Neu- und Gebrauchtwagen aus Deutschland üben daher einen erheblichen Einfluss auf die Entwicklung und die Zusammensetzung der Fahrzeugflotten aus.⁶

Der europäische Markt für Autokatalysatoren wird von drei großen Herstellern dominiert, die jeweils etwa 30% Marktanteil besitzen und alle drei praktisch für alle großen

⁶ Die deutschen Fahrzeug-Exporte gingen vor allem in die USA (35 %), Russland (9 %), Japan (6 %) und die Schweiz (6 %). Die Importe kommen überwiegend aus Japan (35 %), Südkorea (20 %), den USA (19 %) und der Türkei (13 %). Diese Zusammenhänge machen deutlich, welche zusätzlichen Herausforderungen mit einer Produzentenverantwortung in Auslandsmärkten verbunden sind.

Autohersteller tätig sind: Johnson Matthey (England), BASF Catalysts (Deutschland) und Umicore (Belgien).

Aufgrund der hohen europäischen Produktionskapazität für Autokats existiert damit eine besondere Abhängigkeit bezogen auf rohstoffliche Versorgung mit PGM.

3.1.2 Zukünftige Nachfrageentwicklung

Die PGM-Nachfrage für Autoabgaskatalysatoren ist eng mit der Bestandsentwicklung der Fahrzeugflotten in Europa verknüpft. Zunächst sollen die aktuellen Entwicklungen in Deutschland betrachtet werden.

Der Pkw-Bestand in Deutschland ist nach Angaben des Kraftfahrt-Bundesamtes (KBA) in 2010 um 1,4 Prozent gestiegen. Zum 1. Januar 2011 waren insgesamt 42,3 Millionen Autos in Deutschland zugelassen. Die Gesamtzahl der Kraftfahrzeuge inklusive Nutzfahrzeuge und Motorräder ist ebenfalls um 1,4 Prozent auf 50,9 Millionen gestiegen. 72,1 % der Pkw werden von Benzinmotoren angetrieben, der Anteil der Dieselfahrzeuge wächst weiterhin und beträgt nunmehr 26,6 %. Die bei Neuwagen seit Beginn des Jahres vorgeschriebene Euro-5-Norm findet sich bislang bei 7,1 Prozent des Pkw-Bestandes wieder. Mit 43 Prozent entsprechen die meisten Fahrzeuge Euro 4. 6,3 Prozent sind in der schlechtesten Emissionsklasse Euro 1 eingestuft. Das durchschnittliche Fahrzeugalter der Pkw auf deutschen Straßen liegt aktuell bei 8,3 Jahren.⁷

Die meisten Verkehrsszenarien gehen davon aus, dass bis 2030 der Fahrzeugbestand weiter anwachsen wird. Hiermit verbunden wäre auch eine wachsende PGM-Nachfrage, die durch die verschärften Abgasnormen und den höheren Dieselantrieb nochmals potenziert werden. Nach Prognosen von EWI/ Prognos (2005) wird der Dieselantrieb in Deutschland spätestens 2025 den höchsten Marktanteil besitzen. Der Anteil alternativer Antriebstechnologien nimmt bisher nur einen geringen Einfluss auf die Kat-Nachfrage, da immer noch bivalente Lösungen den Markt dominieren, also immer noch ein Benzinmotor mit Katalysator auch bei Hybrid-Technologie und Gasantrieb zum Einsatz kommt. Die Bundesregierung verfolgt das Ziel, dass bis 2020 1 Mio. Elektrofahrzeuge auf Deutschlands Straßen rollen sollen. In der Marktrealität sind jedoch noch keine entsprechenden Veränderungen zu beobachten. Alternative Antriebstechnologien bilden weiterhin die Ausnahme, zum 1. Jan. 2011 waren nur etwa 40.000 Pkw sind mit Hybrid- bzw. Elektroantrieb unterwegs.

Zeitversetzt werden die strukturellen Veränderungen im deutschen Fahrzeugbestand auch in den osteuropäischen Beitrittsländern eintreten. Die Dynamik dieses Prozesses ist auch abhängig davon, wie sich das Verhältnis von Neuwagen und importierten Gebrauchtwagen in den nächsten Jahren entwickeln wird (siehe hierzu auch detaillierte

⁷ Alle Angaben nach <http://www.kfz-betrieb.vogel.de/neuwagen/handel/articles/300201/>

Ausführungen in den Länderstudien). Mit großer Wahrscheinlichkeit werden die Automobilmärkte in der EU-27 weiterhin wachsen. In einem moderaten Klimaschutzszenario nimmt das Fraunhofer-Institut/ISI (2010) an, dass bis zum Jahr 2030 ein Fahrzeugbestand von mehr als 250 Mio. Pkw erreicht wird. Hiervon wären dann ca. 20 % Fahrzeuge mit alternativen Antrieben.

Quelle: Fraunhofer Institut ISI 2010, S. 5

Diese Gesamtbetrachtung verdeckelt, dass die Wachstumspotenziale in der einzelnen EU-Ländern unterschiedlich sind. In den osteuropäischen Beitrittsländern ist beispielsweise die Pkw-Dichte pro Einwohner noch wesentlich geringer als in Westeuropa, bis 2030 werden wahrscheinlich ähnliche Werte wie in Westeuropa erreicht werden. Somit werden die Fahrzeugflotten in diesen Ländern dynamischer wachsen, als in den Staaten Westeuropas. Von daher kommt dem schnellen Aufbau von Recyclingstrukturen in den neuen Beitrittsländern der EU für die Rückgewinnung von PGM eine große Bedeutung zu (dieses Thema wird in den Fallstudien bezogen auf einzelne Länder noch einmal vertiefend aufgegriffen, siehe Kap. 3.6).

3.2 Regulatorische und institutionelle Faktoren

Auf eine ausführliche Würdigung der rechtlichen Rahmenbedingungen der Altfahrtensorgung wird an dieser Stelle verzichtet, da sie nur bedingt das Stoffstrommanagement der PGM aus Abgaskatalysatoren beeinflussen. Gleichwohl ist zu beachten, dass zwischen den Akteuren des Abfallregimes „Altfahrzeugentsorgung“ und dem Stoffstrommanagement im Bereich der Demontage und Logistik eine hohe Schnittmenge besteht.

Die umweltgerechte Entsorgung und Verwertung von Altfahrzeugen ist in Deutschland durch die Altfahrzeug-Verordnung vom 21. Juni 2002 geregelt, zuletzt geändert durch Art. 1 der 1. ÄndVO vom 9.2.06. Mit der Verordnung wurden die Vorgaben der europäischen Richtlinie 2000/53/EG über Altfahrzeuge vom 18. Sept. 2000 in nationales Recht umgesetzt.

Die Wirtschaftsbeteiligten - d.h. Hersteller, Importeure und Entsorgungswirtschaft - haben gemeinsam sicherzustellen, dass ab 2006 mindestens 85% des durchschnittlichen Gewichts eines Altfahrzeugs verwertet oder wieder verwendet und mindestens 80% stofflich verwertet oder wieder verwendet werden. Ab 2015 sind diese Verwertungsziele auf 95% bzw. 85% zu steigern.

Diese mengenorientierten Vorgaben beeinflussen das PGM-Recycling kaum, da das Gewicht des Kats bezogen auf die Erfüllung dieser Quoten kaum eine Rolle spielt. Insofern kann auf eine detaillierte Darstellung der Recyclingpraxis von Fahrzeugen im allgemeinen an dieser Stelle verzichtet werden.

Die folgenden Regelungen des Altfahrzeuggesetzes berühren das PGM-Recycling direkt:

- Von dem Anspruch auf kostenlose Rückgabe ausgenommen sind Altfahrzeuge, bei denen wesentliche Bauteile oder Komponenten (wie z.B. Katalysator) entnommen wurden und die nicht mindestens 1 Monat vor der Stilllegung in der EU zugelassen waren.
- Der Katalysator muss bei der Demontage entfernt werden und wird nach Abfallrecht als besonders überwachungsbedürftiger Abfall eingestuft, wenn er keramische Fasermatten enthält (vgl. Kuchta 2002).
- Das Gewicht des Katalysators wird auf die Gesamtrecyclingquote angerechnet.

Nicht geregelt ist der weitere Verwertungspfad – hydrometallurgisch oder pyrometallurgisch – und auch hinsichtlich der Redistributions-Logistik für Katalysatoren sind keine weiteren Spezifikationen durch das Altfahrzeuggesetz erfolgt. Von Bedeutung für das PGM-Recycling ist, dass im Rahmen Altfahrzeugverordnung generell von einer Produktverantwortung der Fahrzeughersteller ausgegangen wird, die dann Dritte (z.B. Demontagebetriebe) beauftragen können, die ordnungsgemäße Entsorgung vorzunehmen. Hier besteht ein Ansatzpunkt für die Fahrzeugindustrie, durch Vorgaben an ihre jeweiligen Vertragspartner einen Verwertungspfad für das Kat-Recycling zu präferieren und damit die internationale Kreislaufführung von PGM aus Abgaskatalysatoren zu verbessern.⁸ Eine direkte Verantwortung für die Gestaltung des PGM-Recyclings hat die Automobilindustrie bisher immer abgelehnt (siehe hierzu auch die Ergebnisse des European Round Table, Milieucontact et al 2007).

Durch den gesetzlichen Rahmen wird die Wertschöpfungskette „Altfahrzeuge“ strukturiert und die Zuordnung von Aufgaben arbeitsteilig vorgenommen. In dieser Kette vom Letztbesitzer, Gebrauchtwagenhändler, Demontagebetrieb, Kat-Sammler, Aufbereitungsbetrieb für Kats und integriertes Hüttenwerk zur Edelmetallaufbereitung existieren aus Sicht eines geordneten Katrecyclings insbesondere an den jeweiligen Übergabepunkte Schwachstellen, da nicht eindeutig definiert ist, was jeweils mit dem Kat zu geschehen hat.

Kats können aus ökonomischen Motiven bereits durch den Letztbesitzer oder in den Gebrauchtwagenhändler demontiert werden. Teilnehmer des Roadmap-Workshops berichteten, dass Katalysatoren teilweise vor dem Eintreten in das Abfallregime „be-raubt“ werden (da dies beispielsweise für den Gebrauchtwagenhandel in der Hochpreisphase ein erträgliches Nebengeschäft darstellt).

⁸ Eine solche Verantwortung wurde seitens der Automobilindustrie bisher abgelehnt.

Die Demontagebetriebe haben ein großes ökonomisches Interesse, die Kats zu separieren und an den meistbietenden Handler weiterzuverkaufen. Im Prinzip tragen die Erlöse aus dem Verkauf von Autoteilen dazu bei, die Kosten der Entsorgung zu verringern. Sie sind aus Sicht der Betriebe ein erträgliches Zusatzgeschäft. Dies erfolgt vielfach ad hoc zu Tagespreisen gegen Barzahlung (ohne Rechnung). Hier sind zahlreiche Aufkäufer im Markt unterwegs, die nicht an einen technisch hochwertigen Entsorgungsweg gebunden sind. Der geringe Dokumentationsgrad dieser Praktiken erschwert die weitere Verfolgung der Stoffströme. Mit dem Verkauf an einen Händler wird er gebrauchte Kat wieder zur Handelsware und kann damit auch wieder exportiert werden.

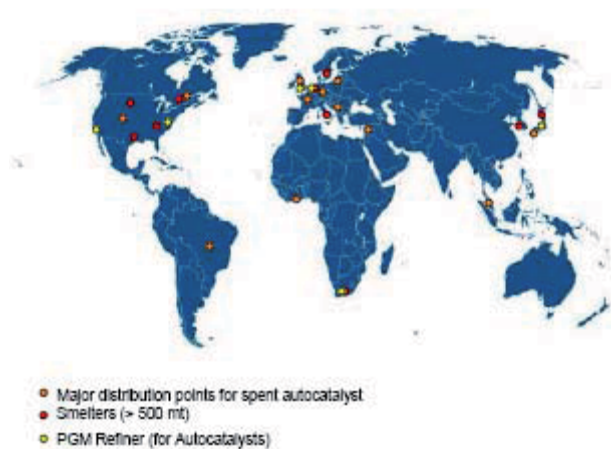
Eine weitere Redistributionsschiene stellen die Rücknahmesysteme der führenden deutschen Automobilhersteller dar, welche defekte Autokatalysatoren durch eigene Werkstattssysteme zurücknehmen und diese Rücknahme in das Liefersystem für Neukatalysatoren integriert haben. Als Sammelanreiz werden bei der Rücknahme dem Kunden Gutschriften gewährt oder Rabatte eingeräumt.⁹

Die international tätigen Rohstoffkonzerne, welche über integrierte Hüttenwerke zur Edelmetallaufbereitung verfügen, sind bestrebt eine flächendeckende Redistribution der Katalysatoren mit festen Vertragspartnern in der Abfallwirtschaft zu organisieren. In diesen Strukturen werden Qualitätssicherungen durchgeführt und der PGM-Gehalt der Kats überprüft. Entsprechend dieses PGM-Gehalts wird auch der Preis bestimmt.

Wie Oliver Stengel, von der Firma Duesmann & Hensel Recycling GmbH, auf dem durchgeführten Workshop darlegte, ist die Redistribution von Autokatalysatoren inzwischen international organisiert. Schwerpunkte der Aktivitäten sind Westeuropa, Nordamerika und Südostasien. Eine zentrale Rolle spielen hierbei die ca. 10 integrierten Anlagen zur Verhüttung von Edelmetallen die einen erheblichen Sog auf die Stoffströme aus den verschiedenen Weltregionen ausüben.

⁹ Vgl. hierzu auch den Beitrag von Engler auf dem Projekt-Workshop in Berlin sowie Engler 2009

Abb. 8: Globale Redistributionsstrukturen im Bereich des Kat-Recyclings



Quelle: Krestin 2009

Dieser Ansatz einer globalisierten Redistribution zeigt deutlich die Konzentration der Edelmetallverhüttung auf wenige Standorte in Europa, Japan und den USA. Ausgewiesenen Handelspunkte für Altkats sind zum Teil in Kontinenten ohne Refiner-Kapazitäten (Südamerika, Afrika, Süd-Ost-Asien), was zur Folge hat, dass eine globale Logistik organisiert werden muss. Als besonderes Defizit dieser Struktur muss angesehen werden, dass in den stark wachsenden Märkten Russlands und Chinas keine Handelspunkte ausgewiesen sind.

Die von Hagelüken angesprochene Problematik „offener Kreisläufe“ wird in diesem Handlungsfeld sehr deutlich. Unübersichtliche Akteursketten, Intransparenz der Stoffströme und fehlende Vorschriften und Vereinbarungen zu einem umweltfreundlichen und ressourcensichernden Entsorgungspfad für Altkats sind als wesentliche Defizite festzuhalten.

3.3 Technische Faktoren

3.3.1 Technische Funktion der Katalysatoren und ihr PGM-Gehalt

Der Einsatz von Abgaskatalysatoren in Fahrzeugen hat seit den 70er Jahren zu einer erheblichen Verbesserung des Emissionsverhaltens von Kraftfahrzeugen beigetragen und deren Schadstoffemissionen um bis zu 95% reduziert. Ausgehend von den USA und Japan, wo Katalysatoren bereits frühzeitig flächendeckend vorgeschrieben waren, wurde die Entwicklung in Europa vor allem durch die Einführung der EURO-Norm vorangetrieben, die seit 1992 Grenzwerte für Kohlenmonoxid (CO), Stickstoffoxide (NOx), Kohlenwasserstoffe (HC) und Partikel (PM) festlegen (die ersten einheitlichen Abgasvorschriften in der Europäischen Gemeinschaft traten allerdings bereits 1970 in Kraft). Die immer wieder verschärfte EURO-Norm unterscheidet dabei sowohl nach

Motortyp (Otto- oder Dieselmotor) als auch nach Kraftfahrzeugtyp (PKW, LKW und Omnibusse, Zweiräder und Mopeds). Seit dem 1. September 2009 gilt europaweit bei der Typprüfung für neue PKW die Euro-5-Norm, welche seit Januar 2011 für alle neu zugelassenen Fahrzeuge bindend ist. Für Lastkraftwagen ist eine neue Euro-6-Lkw-Norm in Vorbereitung. Die stetige Anhebung des Umweltschutzniveaus im Bereich der Abgasregulierung für Fahrzeuge ist zu einem Haupttreiber für Veränderungen im Bereich der Katalysatortechnik geworden.

Heute ist der geregelte Drei-Wege-Katalysator Stand der Technik bei Fahrzeugen mit Otto-Motor. Seine Funktionsweise beruht auf der simultanen Oxidation von HC und CO und der Reduktion von NO_x an einer katalytisch aktiven Edelmetallkomponente (Platin/Rhodium oder Palladium/Rhodium). In der Regel werden Konvertierungsraten von über 90 % erzielt.

Diesel- und Mager-Mix-Motoren haben in den letzten Jahren Marktanteile gewonnen. Sie nutzen den Kraftstoff effizienter aus und erzielen somit einen reduzierten CO₂-Ausstoß. Gleichzeitig entstehen vermehrt Stickoxide, die sich durch Drei-Wege-Katalysatorsysteme nicht mehr bewältigen lassen. Daher kommen in Mager-Mix-Motoren NO_x-Speicherkatalysatoren zum Einsatz und Dieselmotoren werden mit SCR-Katalysatoren (Selective Catalytic Reduction) ausgestattet, um CO, HC und Rußpartikel zu reduzieren. Zusätzlich kommt ein gesonderter Partikelfilter (DPF) zum Einsatz.¹⁰

Die Edelmetallpartikel aus Platingruppenmetallen (PGM) werden als Katalysatorbeschichtungen (dem sogenannten Washcoat) auf einem zumeist keramischen, wabenförmigen Träger aufgebracht und abschließend vom Canner mit einer metallischen Hülle versehen. In Abhängigkeit von der konkreten Abgasnachbehandlungsapplikation und vom Preis wird der PGM-Einsatz modifiziert, wobei die Edelmetallbeladung in den 90er-Jahren im Bereich von 1-10 g/l lag (vgl. Hagelüken 2001), inzwischen aber auch Werte bis zu 15 g erreicht (vgl. van Gelder/ Kammeraat 2008, 3). Der klassische europäische Drei-Wege-Katalysator wird mit einem Pt/Rh-Verhältnis von 5:1 beladen. Während in Otto-Motoren zu großen Teilen Palladium eingesetzt wird, kommt bei Diesel-Fahrzeugen bisher hauptsächlich das wesentlich teurere Platin zum Einsatz, das auch bei den niedrigeren Betriebstemperaturen effektiv wirkt (vgl. Brenscheidt 2001, 24).

Hagelüken, Buchert und Stahl (2005, 72) haben für PKW empirische Untersuchungen angestellt, welche Platinmengen sich abhängig von Motor-Typ und -leistung in gebrauchten Kats befinden. Entscheidend ist dabei die Altersstruktur der Fahrzeuge, da durch die unterschiedlichen gesetzlichen Bestimmungen bei Erstzulassung des Fahr-

¹⁰ Angaben nach Mining Weekly, 30.04.2009 und Mladenov 2009

zeugs (EURO-Norm 1-4) erhebliche Unterschiede beim PGM-Gehalt im Kat festzustellen sind.

Tab. 5: Fahrzeuglöschungen nach Motortyp, -leistung und PGM-Gehalt

Motortyp und Katalysator	Fahrzeuflöschungen in D 2006	PGM in Gramm/Stück nach Hubraum des PKW in Liter				
		0 – 1,4	1,4 – 2	Über 2	0 – 2	Über 2
Gkat						
Benzin	980000	1,14	1,71	2,52		
Diesel	106000				1,43	4,28
Euro1						
Benzin	498000	1,14	2,04	3,33		
Diesel	88000				1,43	4,28
Euro2						
Benzin	548995	1,62	2,66	5,8		
Diesel	197000				1,43	4,28
Euro3						
Benzin	82795	2,85	3,52	4,94		
Diesel	335327				4,09	8,55
Euro4						
Benzin	130909	1,81	3,99	5,89		
Diesel	108693				4,75	8,55
Gesamt Benzin	2240699					
<u>Gesamt Diesel</u>	<u>835020</u>					
	3075719					

Quelle: KBA 2008, Hagelüken, Buchert, Stahl 2005.

In Deutschland werden die Abgasreinigungssysteme immer umfangreicher und technisch anspruchsvoller, was zur Folge hat, dass die PGM-Gehalte pro Abgassystem weiter ansteigen, die Beladungen variieren. Insgesamt nimmt die Vielfalt an Katalysatoren zu.¹¹

Die qualitativen Veränderungen in der PGM-Beladung der Katalysatoren schlagen sich inzwischen auch im europäischen Recyclingaufkommen nieder, dass sich in seiner Zusammensetzung verändert. „The increase has been particularly marked for recycling of platinum from autocatalysts on European vehicles, where recycling weights from vehicles originally registered in Europe are set to increase by around 29 per cent to 375,000 oz in 2010. Palladium recycling weights in Europe are set to grow by 21 per cent to 340,000 oz. The faster growth rate of platinum recycling relative to palladium in Europe reflects both the higher proportion of end-of-life diesel vehicles now being scrapped and that older gasoline vehicles, with higher platinum loadings than today, are also being scrapped in the region.“ (Johnson Matthey – Interim Report 2010, S. 14)

Aus technischer Sicht ist festzustellen, dass sich zwar der PGM-Gehalt bei Kats gleicher Größe seit den 80er Jahren um fast die Hälfte abgenommen hat, da immer effizientere Technologien eingesetzt wurden (Mining Weekly, 30.04.2009), diese Effizienzgewinne aber durch folgende Faktoren wieder absorbiert wurden:

- durch das weitere Wachstum der Fahrzeugflotten in den Volkswirtschaften
- durch die Steigerung der Motorleistungen (PS und Hubraum)
- durch den höheren Anteil an Dieselfahrzeugen, deren Kats deutlich mehr PGM beinhalten. Nach Prognosen von EWI/ Prognos (2005) wird der Dieselantrieb spätestens 2025 den höchsten Marktanteil besitzen.
- durch den erweiterten Emissionsschutz (EU-Abgasnormen 5 und 6).

Auch gibt es aufgrund des hohen Preisniveaus immer wieder Bestrebungen, das PGM durch andere Edelmetalle zu ersetzen oder die Filtereigenschaften durch den Einsatz der Nanotechnologie zu verbessern (vgl. Johnson Matthey 2009). Diese Innovationen haben aber bisher nicht dazu geführt, dass im großen Maßstab eine Backstop-Technologie zum Einsatz gekommen ist (vgl. Wilts 2008), die ohne den Einsatz von Edelmetallen auskommt (vgl. Buchert et al. 2008, 12). Allerdings ist zu beachten, dass langfristig mit zunehmender Elektromobilität eine Fahrzeugtechnologie an Marktanteil

¹¹ Von der Oberklasse bis zum Kleinstwagen sind mehr als fünfhundert unterschiedliche Kat-Typen im Einsatz. Bauform, Volumen und Edelmetallgehalt sind je nach Hersteller, regionalem Einsatz, Motorversion und Baujahr verschieden (vgl. Hagelüken 2005). Durch diese Vielfalt wird eine exakte Bestimmung der PGM-Gehalte immer schwieriger, weil Pt, Pd und Rh in unterschiedlicher Weise eingesetzt werden.

gewinnen kann, die keinen Katalysator mehr benötigt. So ist es das Ziel der Bundesregierung, bis 2020 1 Mill. Elektrofahrzeuge im deutschen Markt zu etablieren.

3.3.2 Verfahrensschritte des PGM-Recyclings

Das Recycling von Kats und die Rückgewinnung der darin enthaltenen PGMs erfolgt in mehreren Bearbeitungsstufen. Zunächst wird das Stahlgehäuse mit hydraulischen Schlagscheren geöffnet und die Katalysatorkeramik entnommen. Der Stahlschrott wird in der Regel direkt weiterverkauft. Die Edelmetalle liegen in der Katalysatorkeramik feinst verteilt vor und machen nur ca. 0,1 bis 0,6% des Gesamt-Katalysatorgewichts (im Schnitt etwa 3 kg inklusive des Trägermaterials) aus. Technisch können zwei grundsätzlich unterschiedliche Verfahren zur PGM-Wiedergewinnung unterschieden werden, hydrometallurgische Verfahren und pyrometallurgische Verfahren. Bei ersteren wird der Washcoat mit starken Säuren behandelt, aus denen die PGM anschließend abgetrennt werden. Das Verfahren setzt nur geringes technisches Knowhow voraus, ist aber mit großen Mengen an toxisch belasteten Abwässern verbunden und erzielt nur mittelmäßige Wiedergewinnungs-Quoten. Beim pyrometallurgischen Verfahren erfolgt die Abtrennung der Edelmetalle durch Einschmelzen im Hochofen, die gemahlene und angereicherte Kat-Keramik wird dabei bei 1600 bis 1800 Grad Celsius mit einem Sammlermaterial (meistens Kupfer) eingeschmolzen (vgl. Wötzel 2007, 100 f.).

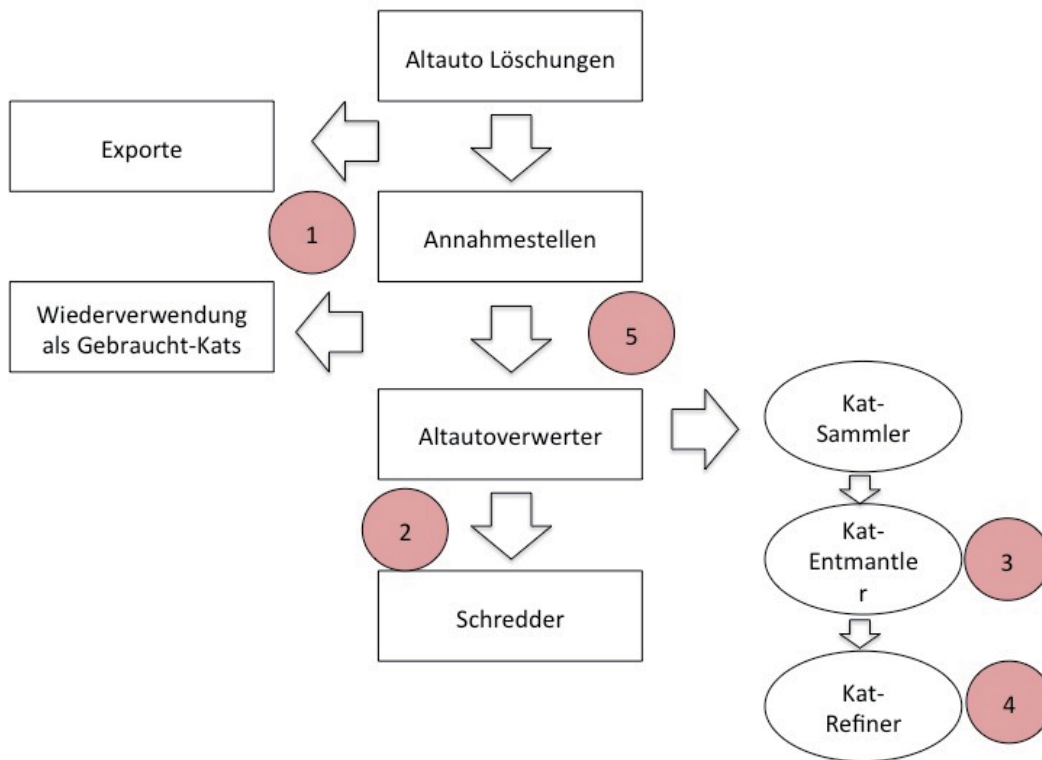
Der abschließende Schritt der PGM-Darstellung, die Raffinierung der PGM, ist ein Prozess, der die Trennung und Reinigung der sechs PGM, Gold und Silber in einem mehrstufigen Verfahren mit mehreren Recyclingprozessen umfasst (Hochfeld 1997, 2). Die PGM-Gewinnung findet dabei sowohl als Nebenprodukt in Kupferhütten statt (vor allem bei geringem PGM-Gehalt) als auch in spezialisierten PGM-Refinern¹², die Wiedergewinnungsquoten von 98% erzielen. Allerdings ist bei der Pyrometallurgie der Energieaufwand höher als bei der Hydrometallurgie.

3.3.3 PGM-Verluste durch Ineffizienzen in der Recyclingkette

Auch innerhalb der nachfolgend schematisch dargestellten Recyclingkette bestehen potenzielle Verlustquellen für PGM, die sowohl in Deutschland als auch in anderen Recyclingsystemen auftreten können (vgl. Hagelücken, Buchert, Stahl 2005, 82ff.; Hagelücken 2001, 228ff.).

¹² Eine detaillierte Beschreibung der technischen Vorgänge findet sich in Hagelücken 2001, S. 240 ff.

Abb. 9: Darstellung des PGM-Recyclings aus Auto-Katalysatoren und potentieller Verlustpunkte



Quelle: Eigene Darstellung in Anlehnung an Hagelüken 2005

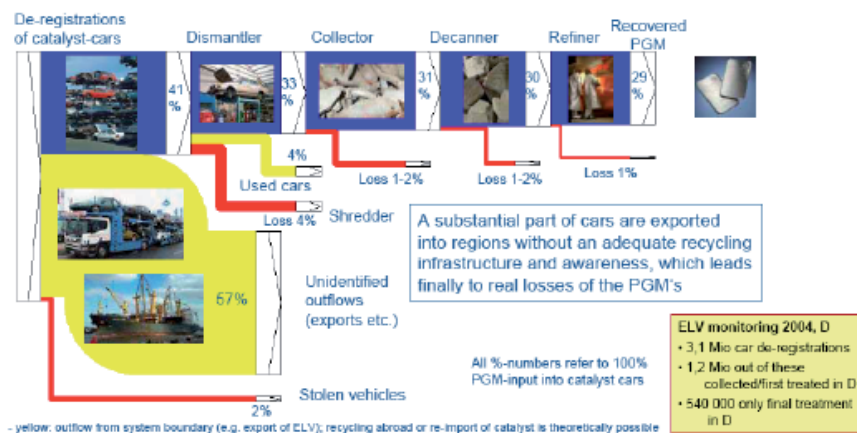
In dieser Kette sind sehr unterschiedliche Demontagepraktiken anzutreffen. Zum einen bestehen Informationsdefizite hinsichtlich der Komplexität der Abgastechnologie, wenn beispielsweise mehrere kleinerer Katalysatoren in einem Fahrzeug enthalten sind (vgl. Eberspächer 2008). Häufig wird der demontierte Kat nicht vorsortiert (nach Kat-Arten) (vgl. Hagelüken 2005, 82) (Punkt 2). Auch die Lagerung von ausgebauten Katalysatoren in nicht geschützten Containern führt durch Regen und Wind zu PGM-Verlusten an die Umwelt und sollte eigentlich vermieden werden.

Ein zweiter kritischer Punkt ist die vollständige Erfassung des Washcoats (Punkt 3). Hier gilt es, während Sammlung, Transport und Lagerung bestimmte Standards einzuhalten, um eine hohe PGM-Wiedergewinnungsquote zu ermöglichen. Gleiches gilt für die Entmantelung des Katalysators, die sowohl geeignete Gerätschaften als auch Know-how erfordert. Durch die Feinstverteilung der PGM im Washcoat ist z.B. eine Absaugungsanlage notwendig, um Verstaubungsverluste zu minimieren. Bei der PGM-Scheidung können sowohl bei der pyrometallurgischen, in besonderem Maße aber bei der hydrometallurgischen Trennung Verluste in Schlacken oder Stäuben bzw. Abwäs-

sen oder Schlämmen auftreten. In Hütten, die nicht auf PGM spezialisiert sind, können auch PGM-Einträge in anderen Seitenströmen auftreten (Punkt 4).

Hagelüken, Buchert und Stahl (2005, 83) schätzen die Größenordnungen für die Verluste in den technischen Behandlungsschritten auf ca. 1-2% bei der Sammlung und 1-2% bei der Entmantelung ein (jeweils etwa 200kg beim aktuellen Sekundär-PGM-Aufkommen).

Abb. 10: Verlustpotenziale in den Bearbeitungsstufen de Fahrzeugrecyclings In Deutschland



24.11.2008

Meeting Amsterdam, AP 2.2, Rainer Lucas/Henning Wilts

3

Materialeffizienz & Ressourcenschonung

Quelle: Hagelüken, Buchert, Stahl 2005, 83

Beim pyrometallurgischen Refining werden bei Platin und Palladium Wiedergewinnungsquoten von bis zu 98%, bei Rhodium bis 85% erzielt.

Aus ökonomischer Sicht ist die Wertbestimmung des Kat-Inhalts ein weiteres Problem. Äußere Beschädigungen aber auch falsche Befüllung mit Kraftstoff können den PGM-Inhalt und damit die Funktionstauglichkeit einschränken. Beim Standardgeschäft des „Telquel-Kaufs“, bei dem ein Pauschalpreis pro Stück vereinbart wird, trägt der Refiner also ein hohes Risiko, dass der Kat unsachgemäß genutzt oder sogar bereits nass-chemisch behandelt wurde. Nur beim „Toll Refining“ wird bei größeren Mengen eine genaue Analyse der zu verwertenden Abfälle durchgeführt und je nach Edelmetallbeladung und Anteil der verschiedenen PG-Metalle der Tagespreis bezahlt. Zur Steigerung der Recyclingquote wäre ein höheres Maß an Transparenz im Markt notwendig (Punkt 5).

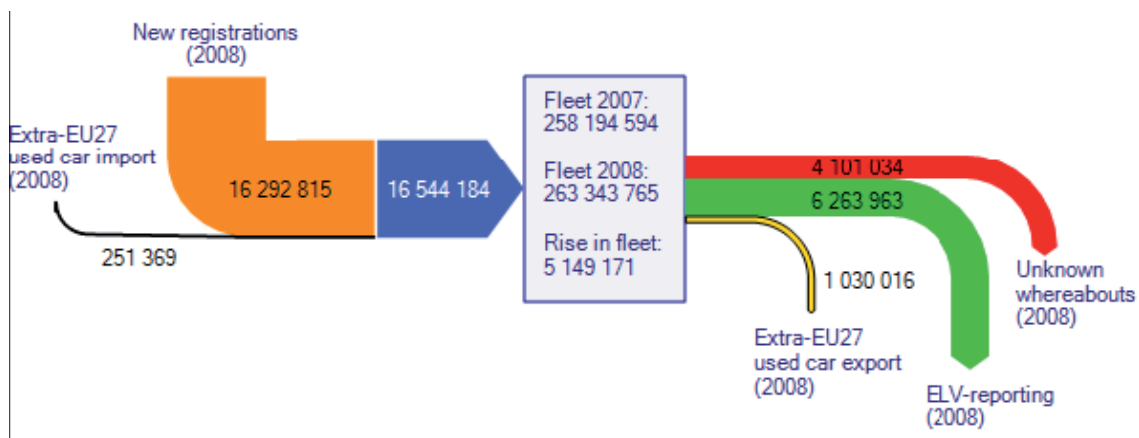
3.4 Verlagerung der PGM-Stoffströme in andere Volkswirtschaften durch den Export von gebrauchten PKW

In diesem Kapitel erfolgt eine statistische Auswertung der exportierten Gebrauchtwagen aus Deutschland und der EU. Anschließend wird die Altersstruktur des Fahrzeugbestands in Deutschland und der EU untersucht, um Rückschlüsse auf die Altersstruktur der Exportmengen ableiten zu können. Wie bereits gezeigt ist das Alter der Fahrzeuge entscheidend für den vermutlichen PGM-Gehalt im Katalysator.

3.4.1 Herkunft und Verbleib der Fahrzeuge in der EU27

Die Relevanz der Exporte auf gesamteuropäischer Ebene verdeutlicht Abb. 11, wonach nur etwa 6,2 Mio. der insgesamt 11 Mio. abgemeldeten Gebrauchtfahrzeuge durch das offizielle Altsautoregime erfasst werden. Allerdings ist nach Angaben von Mehlhart et al. 2011 S. ii der überwiegende Anteil der Kategorie „unknown whereabouts“ einer Verschrottung oder Hortung innerhalb der EU zuzurechnen. Für die überwiegend hochklassigen und relativ neuwertigen Gebrauchtfahrzeuge aus Deutschland spielt der Export dagegen eine deutlich signifikantere Rolle.

Abb. 11: Herkunft und Verbleib von Fahrzeugen in der EU27 in 2008



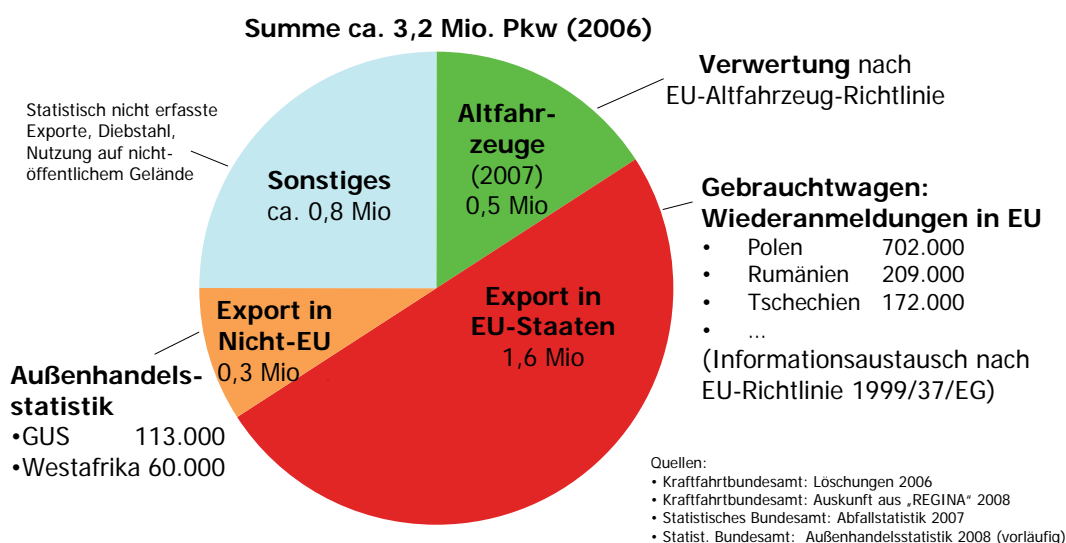
Quelle: Eurostat External trade statistics 2009, ACEA 2008a

3.4.2 Gebrauchtwagen-Export aus Deutschland Auswertung der COMEXT-Datenbank

Mit Hilfe der Statistiken zu Exporten und Verwertung lässt sich der Verbleib der stillgelegten Pkws in Deutschland zum großen Teil erklären (siehe Abb. 11). Mindestens 60 % der endgültig gelöschten Pkws wurden nach statistischen Angaben im Jahr 2008

aus Deutschland als Gebrauchtwagen exportiert, ca. 50 % in EU-Staaten, ca. 8 % in Nicht-EU-Staaten. Ein Sechstel (15-16 %) wurde entsprechend der Abfallstatistik des Statistischen Bundesamtes im Jahr 2007 als Altfahrzeuge verwertet (Destatis 2009b). Für ca. 25 % der Pkw-Löschungen ist der Verbleib statistisch nicht belegbar. Hier kommen weitere, statistisch nicht erfasste Exporte, ansonsten Diebstahl oder Nutzung auf nicht öffentlichem Gelände in Frage.

Abb. 12: Verbleib der gelöschten Pkw in Deutschland 2008



Quellen: Kraftfahrtbundesamt: Löschungen 2006, Kraftfahrtbundesamt: Auskunft aus „REGINA“ 2008, Statistisches Bundesamt: Abfallstatistik 2007, Statist. Bundesamt: Außenhandelsstatistik 2008 (vorläufig)

Etwa die Hälfte aller endgültig stillgelegten Fahrzeuge (ca. 1,6 Millionen) ging im Jahr 2008 nach statistischen Angaben als Gebrauchtwagen in andere EU-Staaten. Zur Erfassung der Exporte zwischen den EU-Staaten ist die EU-Handelsstatistik COMEXT, in der Handel mit gebrauchten Fahrzeugen differenziert nach vier Motorklassen verzeichnet ist, kaum geeignet, da aufgrund der Meldeschwellen keine vollständige Erfassung der Exporte erfolgt. Denn meldepflichtig sind beim Export aus Deutschland in einen anderen Mitgliedsstaat der EU (Intrahandelsstatistik) Unternehmen, deren innergemeinschaftliche Warenverkehre im Vorjahr bzw. im laufenden Jahr den Wert von 300.000 EUR übersteigen. Vielfach sind im Gebrauchtwagenhandel Kleinunternehmen tätig, welche diesen Schwellenwert nicht erreichen.

3.4.3 Auswertung der Exporte aus Deutschland in andere EU-Staaten (REGINA-Datenbank)

Zentrale Quelle ist hier das Zentralregister „REGINA – Registration and Information Agreement“ des Kraftfahrtbundesamtes (KBA), das auf Grundlage der EU-Richtlinie 1999/37/EG eingerichtet wurde¹³. Spitzenreiter sind Polen mit 700.000, Rumänien mit 210.000 und Tschechien mit 170.000 Importen im Jahr 2008, siehe nachfolgende Tabelle.

¹³ Eigentliches Ziel der Datenbank ist jedoch nicht das Monitoring von Stoffströmen, sondern vor allem die Bekämpfung internationaler Kriminalität im Bereich Autodiebstahl.

Tab. 6: Gebrauchtwagen-Exporte in andere EU-Staaten: REGINA-Statistik – Mitteilungen an das KBA über ehemals in Deutschland zugelassene Fahrzeuge

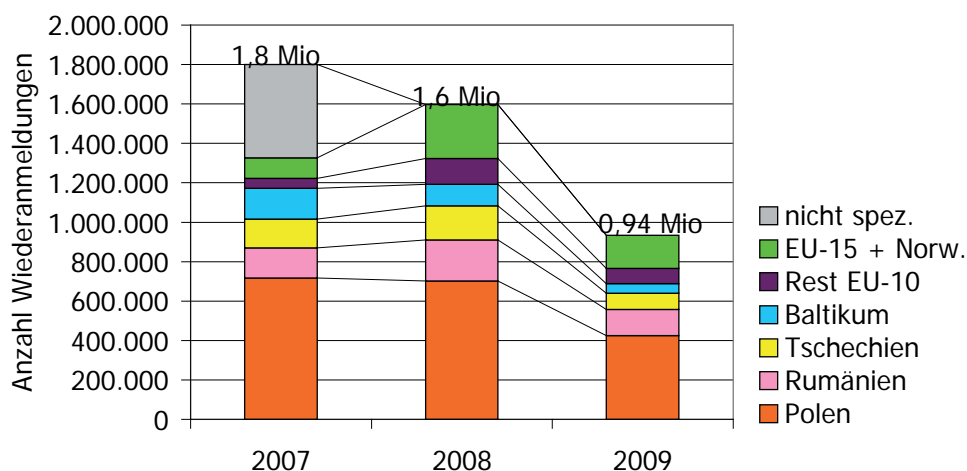
	Land	Anzahl 2007	Anzahl 2008	Anzahl 2009
EU 10	Polen	716.409	702.030	425.686
	Tschechien	144.993	171.657	82.993
	Slowakei		27.316	26.585
	Ungarn		20.606	13.520
	Litauen	106.743	60.531	36.473
	Lettland	48.946	35.996	7.520
	Estland		12.656	5.208
	Rumänien	154.244	208.637	131.102
	Bulgarien	51.261	83.619	35.863
	Finnland		17.874	13.403
EU15	Dänemark		10.937	12.864
	Schweden		8.388	4.721
	Großbritannien		1.730	1.326
	Niederlande	61.149	57.564	53.268
	Belgien		22.791	28.212
	Luxemburg		7.244	9.325
	Österreich		2.812	2.456
	Spanien	43.283	23.847	10.421
	Italien		25.755	22.988
	Norwegen		94.263	9.770
	Summe der tabellierten Länder	1.327.028	1.596.253	933.704

Quelle: KBA 2007, KBA 2009, KBA 2010

In den Jahren 2004 und 2006 hatte Litauen mit gut 250.000 Importen pro Jahr noch den zweiten Platz inne, die Exporte sind jedoch rückläufig (bei den Zahlen zu 2009 ist zu berücksichtigen, dass hier Sondereffekte durch die Umweltprämie aufgetreten sind, die einen deutlichen Rückgang von Exporten vor allem bei älteren Fahrzeugen bewirkt hat). Abb. 13 verdeutlicht, dass die Inner-EU-Exporte von Gebrauchtwagen zu ca. 80%

in die neuen Mitgliedsländer gehen, wobei Polen nach wie vor eine Sonderstellung einnimmt.

Abb. 13: Wiederanmeldungen von Gebrauchtwagen aus Deutschland



Quelle: KBA 2007, KBA 2009, KBA 2010

3.4.4 Direkte Gebrauchtwagenexporte aus Deutschland in Nicht-EU-Staaten

Im Vergleich zu den EU-Exporten fielen die Exporte in Nicht-EU-Staaten gering aus. Die Außenhandelsstatistik wies insgesamt ca. $\frac{1}{4}$ Million Gebrauchtwagen-Exporte (Pkw und Wohnmobile) aus, knapp die Hälfte davon in die Staaten der ehemaligen Sowjetunion (ohne Baltikum), siehe Tab. 7. Aufgrund der vergleichsweise niedrigen Meldeschwellen ist davon auszugehen, dass die Statistik die realen Exporte zu einem relativ hohen Anteil erfasst.

Tab. 7: Gebrauchtwagen-Exporte in Nicht-EU-Staaten entsprechend der Außenhandelsstatistik, PKW und Wohnmobile mit Otto- und Dieselmotor

Land \ Jahr	2007	2008 (vorläufige Zahlen)
Nicht-EU gesamt	256.391	243.294
Davon GUS¹⁴	116.307	112.548
davon Russland	44.130	40.758
davon Weißrussland	21.424	24.518
Davon Westafrika¹⁵	53.323	59.815

Quelle: Destatis 2009¹⁶

3.4.5 Exporte aus der EU in Nicht-EU-Staaten

Die Exporte in Nicht-EU-Staaten werden statistisch in der Außenhandelsstatistik der EU, COMEXT, erfasst. Da die Meldeschwellen für den Extra-EU-Handel relativ gering sind (1000 Euro bzw. 1000 kg, vgl. SRU 2008, 731), ist eine relativ hohe statistische Erfassungsrate anzunehmen. Unter den Kennziffern CN8 87032190¹⁷, CN8 87032290, CN8 87032390 und CN8 87032490 sind in der EU Außenhandelsstatistik COMEXT gebrauchte PKW mit Otto-Benzin-Motor bzw. 8703 31 90, 8703 32 90 und 8703 33 90 für Dieselfahrzeuge unterschiedlicher Motorklassen verzeichnet, z.B. für die niedrigste Motorgröße unter einem Liter Hubraum:

¹⁴ Beziehungsweise Staaten der ehemaligen Sowjetunion ohne baltische Staaten

¹⁵ Hierunter wurden 18 westafrikanische Staaten zusammengefasst: Angola, Äquatorialguinea, Benin, Burkina Faso, Cote d'Ivoire, Gabun, Gambia, Ghana, Guinea, Kamerun, Liberia, Marokko, Mauretanien, Niger, Nigeria, Senegal, Sierra Leone, Togo

¹⁶ Destatis 2009 - Statistisches Bundesamt: Warenverzeichnis Außenhandelsstatistik 8-Steller, Länderverzeichnis, Daten für 2007. Wiesbaden 2009

¹⁷ Die offizielle Beschreibung der Handelsklasse lautet: „Motor cars and other motor vehicles principally designed for the transport of persons, incl. station wagons and racing cars, with spark-ignition internal combustion reciprocating piston engine of a cylinder capacity $\leq 1.000 \text{ cm}^3$ used (excl. vehicles for the transport of persons on snow and other specially designed vehicles of subheading 8703.10)“

Tab. 8: Systematik der EU Außenhandelsstatistik für die Klassifizierung von Fahrzeugen

Warennummer	Fahrzeug	Motorisierung	Hubraum	Status
CN8 87032190	PKW	Ottomotor	bis 1000 cm ³	Ge- braucht
CN8 87032290			1000 - 1500 cm ³	
CN8 87032390	PKW, Wohn- mobile		1500 - 3000 cm ³	
CN8 87032490			> 3000 cm ³	
CN8 87033190	PKW	Dieselmotor	bis 1500 cm ³	
CN8 87033290	PKW, Wohn- mobile		1500 – 2500 cm ³	
CN8 87033390			> 2500 cm ³	

Quelle: Statist. Bundesamt: Außenhandelsstatistik 2008 (vorläufig)

Ähnliches gilt für Russland, wo sich nach Angaben der Eurostat Foreign Trade Statistics zwar gegenüber 2002 die Anzahl der Fahrzeuge halbiert, der Wert pro Fahrzeug aber fast verdoppelt hat. Für Russland sind dabei auch zunehmende Importbeschränkungen für Gebrauchtfahrzeuge als Faktor zu berücksichtigen, insgesamt ist aber im Zeitverlauf eine Verlagerung in weitere Zielländer zu beobachten (s. auch Kapitel 3. 5).

Tab. 9 zeigt die 10 wichtigsten Nicht-EU-Export-Zielländer aus der EU 27 in 2007. Danach ergeben sich als Zielgebiete vor allem Osteuropa, Westafrika und der Balkan. Kasachstan war 2007 mit 220.608 Fahrzeugen der Hauptabnehmer für Gebrauchtwagen aus der EU27. Vergleicht man die Daten mit denen der EU15-Staaten zeigt sich, dass diese Exporte nach Osteuropa zu 93% aus den neuen Mitgliedsstaaten heraus stattfinden (während der Großteil der Exporte nach Westafrika allein aus geographischen Gründen aus den alten Mitgliedsstaaten stattfindet). Insgesamt lässt sich im Vergleich mit den Daten von 2002 eine Verlagerung der Gebrauchtfahrzeugexporte in Richtung Osten beobachten. Möglichen Gründen hierfür wird in den Länderstudien in Kap. 3.3 noch näher nachgegangen, allgemein kann aber eine gewisse Sättigung der Gebrauchtfahrzeugmärkte (wenn auch auf hohem Niveau) in den neuen EU-Mitgliedsstaaten und ein gestiegene Ansprüche an die Fahrzeuge – sowohl von den Kundenwünschen als von gesetzlichen Anforderungen her - konstatiert werden, die dann zu einer Zweit- oder Drittnutzung in Osteuropa führen.

Tab. 9: Top 10 Export von Gebrauchtfahrzeugen aus der EU27 in Nicht-EU-Exportländer in 2007

	Gewicht in t	Anzahl	Durchschnittlicher Wert pro Fahrzeug in Euro
Kasachstan	286.093,4	220.608	1.017
Guinea	12.745,5	114.758	140
Russische Föderation	147.227,6	102.539	8.843
Weißrussland	128.966,2	92.452	3.331
Serbien	36.844,1	52.818	2.958
Benin	56.514,7	46.082	1.324
Kirghizistan	50.250,3	38.679	903
Bosnien-Herzegowina	32.509	34.246	3.064
Norwegen	52.897,2	32.563	19.596
Tadschikistan	36.492,9	31.129	676
Gesamt Afrika	337.815,2	391.377	
Gesamt Osteuropa (ohne EU)	846.957,1	673.008	
Gesamt Alle Länder	1.709.983,7	1.162.177	

Quelle: Eurostat 2008, CN8-Außenhandelsstatistik der EU 2008

Tab. 10 gibt einen Überblick über die Gesamtexportstruktur der EU27 bei Gebrauchtfahrzeugen. Danach wurden im Jahr 2007 von den Ländern der EU27 über 1,1 Mio. gebrauchte PKW mit einem Wert von über 4,1 Mrd. Euro in Länder außerhalb der EU exportiert. Damit verbunden war ein Massenstrom von 1,3 Mio. t, die nicht in der EU zum Recycling anfielen. Dem gegenüber stand ein Import von ca. 227.000 Fahrzeugen, einer Masse von 316.000 t und einem Wert von 1,2 Mrd. Euro. Im Vergleich zu den Zahlen von 2002 bedeutet das einen Anstieg der Exporte außerhalb der EU um 41%, und das obwohl wichtige Zielländer mit dem Beitritt der Luxemburggruppe 2004 (Estland, Lettland, Litauen, Polen, Tschechien, Slowakei, Ungarn, Slowenien, Malta und Zypern) 2007 nicht mehr als Exporte außerhalb der EU, sondern als Inner-EU-Handel gewertet werden.

Tab. 10: Vergleich der außereuropäischen Im- u. Exporte von Gebrauch-PKW in 2002 und 2007

PARTNER		Gewicht in t	Anzahl	Durchschnittlicher Wert pro Fahrzeug in Euro
2007				
EU27_EXTRA	IMPORT	316.222	227.030	1.217.663.220
EU27_EXTRA	EXPORT	1.305.326,9	1.162.177	4.130.478.116
2002				
EU15_EXTRA	IMPORT	164.991	147.841	615.849.426
EU15_EXTRA	EXPORT	914.909,3	820.299	4.035.477.730

Quelle: Eurostat CN8-Außenhandelsstatistik der EU 2008

Die Auswertungen der Exportstatistiken zeigt auch, dass die Exporte nach Westafrika eine geringere Rolle spielen als in der bisherigen Debatte angenommen. Von den insgesamt über 1,7 Mio. Exporten gehen nur etwa 50.000 Fahrzeuge in Richtung Afrika. Diese Zahlen bestätigen den Rückgang der Exporte nach Westafrika, wie er bereits von Buchert et al. (2007, 15) anhand empirischer Untersuchungen im Hamburger Hafen festgestellt worden war. Als Ursache waren dort Importrestriktionen für Gebrauchtfahrzeuge in den Zielländern vermutet worden.

3.4.6 Abschätzung der PGM-Verluste

Um abschätzen zu können, welche Verluste an PGM mit diesen Exportstrukturen verbunden sind, müssen über die dargestellten Auswertungen der Außenhandelsbilanzen weitere Annahmen zur Ausgestaltung der Recyclinginfrastrukturen in den Zielländern, zur Relevanz von Transitexporten und zur Altersstruktur der exportierten Fahrzeuge getroffen werden.

Recyclinginfrastrukturen

Die Abschätzung der PGM-Verluste durch den Export von Gebrauchtwagen aus Deutschland ist stark abhängig von den Annahmen über die ordnungsgemäße Demontage und die angewendete Recyclingtechnik für Autokatalysatoren in den jeweiligen Zielländern. Ausgehend von der geltenden Rechtslage müssten in den EU10 sämtliche Katalysatoren bei Altfahrzeugen demontiert und verwertet werden; dagegen existiert in den allermeisten relevanten Zielländern von exportierten Gebrauchtwagen aus der EU überhaupt keine spezielle Regulierung für das Kat-Recycling (mit Ausnahme von Norwegen, Japan, Schweiz und den USA). Vor diesem Hintergrund ist es wichtig, in den Zielländern der Gebrauchtwagenexporte die jeweiligen Rahmenbedingungen für das Kat-Recycling zu ermitteln.

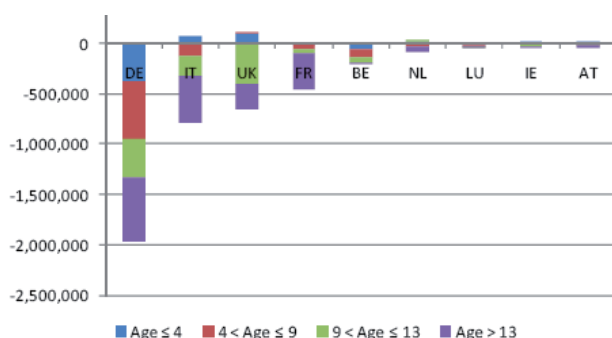
Transitexporte

Wie gezeigt spielt der direkte Export von Gebrauchtwagen aus Deutschland in Nicht-EU-Staaten nur eine untergeordnete Rolle, in ca. 80 % der Fällen werden deutsche Gebrauchtfahrzeuge zunächst in andere EU-Mitgliedsstaaten exportiert. Für die Abschätzung von der entstehenden PGM-Verluste muss jedoch berücksichtigt werden, dass viele dieser Fahrzeuge nach einer Zweitnutzung in der EU10 noch einer Drittnutzung außerhalb der EU und damit des Geltungsbereichs der Altauto-Richtlinie zugeführt werden (vgl. Hagelüken 2007, S. 6). Diese Strukturen lassen sich innerhalb der Gebrauchtwagenstatistiken nicht ablesen: Nach der Wiederanmeldung des Fahrzeugs z.B. in Polen gilt der anschließende Export in Länder wie Kasachstan als polnischer Export.

Altersstruktur

Entscheidend für die Abschätzung der PGM-Verluste im Bereich Autokatalysatoren ist zudem wie gezeigt die Altersstruktur der exportierten Gebrauchtfahrzeuge (vgl. Tab. Fahrzeuگلöschungen nach Motortyp, -leistung und PGM-Gehalt). Wie in Abb. 14 dargestellt sind etwa ca. 30% der Exporte aus Deutschland älter als 30 Jahre, ca. 20% zwischen 9 und 13 Jahren und 30% zwischen 4 und 9 Jahren. Deutlich wird auch dass die Klasse der relativ neuen Gebrauchtwagen (bis vier Jahre), die in Deutschland etwa 20% der Gebrauchtwagen ausmachen, in der EU fast ausschließlich aus Deutschland kommen.

Abb. 14: Altersstruktur exportierter Gebrauchtwagen im europäischen Vergleich, Durchschnittswerte 2004 bis 2009



Quelle: Mehlhart 2011

Ausgehend von der Altersstruktur der Fahrzeuگلöschungen aus Abb. 14 ergibt sich ein Gesamtpotenzial exportierter PGM im Bereich Autokatalysatoren von ca. 6t PGM (vgl. Buchert et al. 2007, 1). Geht man davon aus, dass von den direkten Exporten ins Nicht-EU-Ausland ca. 90% in Länder ohne geeignete Infrastrukturen für die PGM-Rückgewinnung gehen (die genannten Ausnahmen entsprechen ca. 10% dieser Exporte) und von den 1,5 Mio. Exporten ins EU-Ausland ca. 20% anschließend einer Drittnutzung in solchen Ländern zugeführt werden, ergibt sich durch den Export von Gebrauchtwagen eine Potenzialminderung für die weltweite Rückgewinnung von PGM von ca. 1,5 - 2t PGM (diese Abschätzung liegt damit relativ dicht an den Aussagen von

Buchert 2010, der einen „PGM-Totalverlust“ durch Exporte in Länder außerhalb der EU27 von ca. 1,6t PGM angibt). Würde man zusätzlich annehmen, dass in den EU10 die Demontage und angemessene Verwertung von Autokatalysatoren noch nicht in allen Bereichen technisch und organisatorisch optimiert ist, so ergäbe hier ein zu erschließendes Gesamtpotenzial von bis zu ca. 4t PGM.

3.4.7 Bewertung der Datenlage

Altfahrzeuge gelten nach dem Basler Übereinkommen als gefährliche Abfälle und ihre Exporte werden in den entsprechenden Statistiken von Eurostat und dem Statistischen Bundesamt erfasst. Dagegen ist die Datenlage für Gebrauchtfahrzeuge bisher noch relativ unbefriedigend und damit wenig aussagekräftig, dies gilt vor allem für den Handel innerhalb des europäischen Binnenmarkts. In der Zukunft soll sich dies durch die Waste Statistics Regulation ändern. Diese wurde bereits 2002 verabschiedet und soll eine europaweit einheitliche Erfassung und besseres Monitoring grenzüberschreitender Abfälle ermöglichen.

Durch das Kraftfahrzeugbundesamt (KBA) werden alle aus dem Fahrzeugregister gelöschten Fahrzeuge erfasst (Außerbetriebsetzungen). Da der jeweilige Abmeldegrund nicht mit erfasst wird, ist trotz der REGINA-Datenbank der letztendliche Verbleib eines Teils der aus der Kraftfahrzeugstatistik gelöschten Fahrzeuge nicht geklärt und somit existieren nach wie vor systematische Defizite in der Erfassung der Exportströme von gebrauchten Fahrzeugen. Auch ist davon auszugehen, dass aus den erfassten Zielländern wiederum Exporte in Nicht-EU-Staaten erfolgen, die dann aber nicht mehr nachzuvollziehen sind. Angaben über den Zustand, Wert, Alter der Fahrzeuge werden seitens der Statistik nicht gefordert.

Die statistische Erfassung geht davon aus, dass es sich hierbei tatsächlich um Gebrauchtwagen handelt und hierin keine verdeckten Exporte von Altfahrzeugen enthalten sind. Dass eine hier eine Grauzone¹⁸ zwischen Abfallstatistik und Fahrzeugstatistik existiert, hängt auch mit nicht hinreichenden Definitionen hinsichtlich der Fahrtauglichkeit ab.

Einen Einblick in die Praxis des Gebrauchtwagenhandels mit alten, fast schrottreifen Fahrzeugen gibt der nachfolgende Auszug aus einem Artikel der Österreichischen Zeitung „Die Presse“ vom 4.07.2009¹⁹: „Die meisten Pkw haben einen Wert von „weit we-

¹⁸ Der Begriff „Grauzone“ soll deutlich machen, dass die Definitionen im Abfallrecht und in den Zollbestimmungen bisher keine hinreichende Ansatzpunkte bieten, klar zwischen Gebrauchtwagen und Altfahrzeug zu unterscheiden.

¹⁹ <http://diepresse.com/home/wirtschaft/international/492556/Oesterreichische-Schrottautos-fuer-Afrika>

niger“ als 2000 Euro, weiß man bei der Reederei Grimaldi in Hamburg. Sie ist einer der größten Autovershiffer in Europa. Pro Jahr, erzählt Dirk Peters, bringe man 400.000 Fahrzeuge nach Afrika. Wöchentlich verlassen zwei Schiffe Hamburg und laufen fast jeden Staat an der Westküste des Kontinents an. Je nach Größe des Fahrzeugs und Bestimmungsort verlangt Grimaldi zwischen 300 und 500 Euro für den Transport. Das ist der „RoRo“-Preis: Roll-on, Roll-off. Die Pkw stehen in Zentimeterabstand auf der Fähre: Bei starkem Seegang kommen sie mit ein paar zusätzlichen Beulen an. Doch das stört bei diesen Autos niemanden.“

Die Belieferung für diesen Export erfolgt aus vielen westeuropäischen Staaten. Interessantweise sind die Umsätze in diesem Bereich während der Abwrackprämien um 20 bis 30 % zurückgegangen (Die Presse, 4.07.2009). In den Anzeigen der Fahrzeugaufkäufer wird offen damit geworben, das auch Fahrzeuge ohne TÜV (in Österreich Pickerl) für den Export gekauft werden. Originalzitat eines Händlers aus Osteuropa: „Wir exportieren das Auto (...) In die Märkte, in denen es egal ist, ob es ein Pickerl hat oder nicht. Oder viele Kilometer.“ (Die Presse, 4.07.2009)

Es ist davon auszugehen, dass die meisten dieser Exporte nicht statistisch erfasst werden. Gleichzeitig führen diese Exportpraktiken dazu, dass schrottreife Fahrzeuge einer ordnungsgemäßen Entsorgung entzogen werden. Soweit diese Fahrzeuge mit einem Kat ausgestattet sind, werden auch die hierin enthaltenen Edelmetalle exportiert.

Die aufgezeigten Informationsdefizite haben zur Folge, dass die vorgenommenen Potenzialabschätzungen noch mit erheblichen Unsicherheiten verbunden sind. Anhand einer Modellbeschreibung (Input, Bestände, Output) soll dies noch einmal nachvollzogen werden.

In den nationalen Fahrzeugbestand gehen Neufahrzeuge ein, die entweder in Deutschland oder im Ausland produziert wurden. Hinzu kommen Importe von gebrauchten Fahrzeugen. Hieraus ergibt sich ein Fahrzeugbestand, der hinsichtlich Anzahl und Motorausstattung gut dokumentiert ist. Allerdings kann von der Motorklasse nicht direkt auf die PGM-Gehalte in den Kats geschlossen werden, da der Gehalt nach Baujahr und Baureihe immer wieder variiert. Allgemein ist bekannt, dass die PGM-Gehalte insbesondere durch den zunehmenden Anteil von Dieselfahrzeugen steigen.

Die Abgänge aus dem Bestand durch Abmeldung und Export von Gebrauchtwagen können nur teilweise nachvollzogen werden. Die Zielländer dieser Exporte können bezogen auf das erste Zielland ermittelt werden, ob diese Fahrzeuge dann nochmals exportiert werden und in welchem Umfang ist derzeit nicht zu ermitteln. Somit ist es auch nur möglich, den Verlust bezogen auf die deutsche Volkswirtschaft zu ermitteln. Verlustannahmen in den Zielländern müssen durch länderbezogene Studien gestützt werden.

Die Zusammenhänge sind in der nachfolgenden Abbildung dargestellt.

Abb. 15: Unsicherheiten gewonnener PGM-Mengen



Quelle: eigene Darstellung

Daraus PGM-Verlust-Potenzial nicht exakt ermittelt werden, sondern es sind nur Abschätzungen möglich.

3.5 Länderstudien zur PGM-Rückgewinnung aus Autokatalysatoren

Die enormen Materialabflüsse die mit den Export von Gebrauchtwagen vor allem nach Osteuropa verbunden sind, führen zu neuen Anforderungen an ein internationales Stoffstrommanagement. In diesem Abfallregime ist die Behandlung der Abgaskatalysatoren ein kleines Handlungsfeld, welches aus Sicht der Abfallwirtschaft kaum ins Gewicht fällt. Die größten Ineffizienten im Stoffstrommanagement sind derzeit nicht technischer Natur, sondern hängen mit mangelnden Aufbau effektiver Recyclingstrukturen für Altfahrzeuge in den Zieländern der Neu- und Gebrauchtwagenexporte zusammen. Interesse an einer besseren, internationalen Kreislaufführung der in den Kats enthaltenen Platingruppenmetallen hat vor allem die sekundäre Rohstoffwirtschaft mit ihren großen Anlagen zur Rückgewinnung von Edelmetallen. Sie ist dazu übergegangen, eigene Redistributionsstrukturen aufzubauen, die sich außerhalb des Abfallregimes bewegen.

Vor diesem Hintergrund kann nicht eine einfache Rechnung aufgemacht werden, welche die deutschen Gebrauchtwagen-Exporte generell als Verlustquelle für die PGM-Rückgewinnung ansieht. Nicht die Gebrauchtwagenexporte sind das Problem, sondern die fehlenden Rahmenbedingungen und Strukturen in den Export-Zielländern für ein hochwertiges Recycling der Fahrzeuge und eine systematische Aufbereitung der Katalysatoren. Es ist daher zu überlegen, welche Strategien gerade in den schnell wachsenden Volkswirtschaften dazu beitragen können, effektive Erfassungs- und Verwertungsstrukturen aufzubauen. Damit dies gelingen kann, müssen die Entwicklungen und Rahmenbedingungen dieser Länder genauer betrachtet werden und Maßnahmen entwickelt werden, die an diesen Bedingungen anknüpfen.

Die nachfolgende durchgeführten, exemplarischen Länderstudien für Russland, Polen und die baltischen Staaten soll diesen Kenntnisstand verbessert werden. Mit den Länderstudien soll der konkrete Handlungsrahmen und die Einflussfaktoren auf Handlungsbedingungen für das PGM-Recycling erfasst werden, um konkrete Ansatzpunkte für ein verbessertes Stoffstrommanagement zu identifizieren.

Zur näheren Analyse wurden fünf Länder ausgewählt: Russland als wachstumsstarkes Schwellenland und Polen, und die baltischen Staaten Lettland, Estland und Litauen als neue Mitglieder in der EU. Alle fünf Länder zeichnen sich durch hohe Wachstumsraten ihrer Fahrzeugbestände aus und sind wichtige Abnehmer von Gebrauchtfahrzeugen aus Deutschland.

Die Länderstudien dienen dazu, die reale Entwicklung nachzuvollziehen und die Handlungsbedingungen für den Aufbau eines internationalen Stoffstrommanagements zu ermitteln. Zur Gewinnung einer ausreichenden Informationsbasis wurden statistische Daten ausgewertet, Desktop-Recherchen in der jeweiligen Landessprache und Experteninterviews durchgeführt. Trotz dieser umfangreichen Recherche blieben Informationslücken, die mit den erwähnten Methoden nicht zu schließen waren.

Die Darstellung der Ergebnisse erfolgt für alle Länder im Rahmen der folgenden Gliederung:

- Entwicklung des Fahrzeugbestands/PGM-Potenzials
- Rahmenbedingungen
- Status der Altfahrzeug-Recycling/PGM-Rückgewinnung; Probleme der Recyclingpraxis, relevante Akteure
- Perspektiven für eine verbesserte PGM-Rückgewinnung, Anknüpfungspunkte für ein internationales Stoffstrommanagement

Die Ergebnisse der Länderstudie werden im Kapitel 3.5.4 noch einmal in eine mehr systemorientierte Betrachtung überführt, um die Dynamiken zu verstehen, die die Steigerung der PGM-Potenziale in den Fahrzeugbeständen auslösen. Eine Berechnung von Johnson Matthey zur Abschätzung der PGM-Potenziale wird vorgestellt und kritisch gewürdigt.

3.5.1 Russland

3.5.1.1 Entwicklung des Fahrzeugbestands und des PGM-Potenzials

Nach einer Studie der Agentur Awtostat gab es Mitte 2009 in Russland etwas mehr als 34,4 Mio. leichte Automobile, was eine Steigerung gegenüber Anfang 2008 von 7,6% bedeutet. Das russische Wirtschaftsministerium geht davon aus, dass sich der Fahrzeugbestand (Pkw) im Jahr 2020 auf über 90 Mio. Fahrzeuge im Jahr 2020 verdreifachen wird. Außerdem werden massive Ersatzinvestitionen erwartet, da der Fahrzeugbestand überaltert ist. Gründe für das Wachstum des Fahrzeugbestandes sind das schnelle Ansteigen der Wirtschaft und der damit verbundene Wohlstand der Bevölkerung.

Tab. 11: Zahl der leichten Automobile im Privatbesitz pro 1.000 Einwohner (zum Jahresende; in Stück)

Jahr	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009 *
Automobile pro 1.000 Einwohner	137,2	145,8	153,2	159,3	169,0	177,8	195,4	211	225
Bevölkerung (zum 1. Januar)	146,3	145,6	145,0	144,2	143,5	142,8	142,2	142,0	141,9

*Schätzung

Anmerkung: leichte Automobile = Pkw + Kleintransporter; zum Vergleich: Automobilbestand in Deutschland 2009: 550 Fahrzeuge pro 1.000 Einwohner

Quelle: Föderaler Statistikdienst, nach Wolf 2011

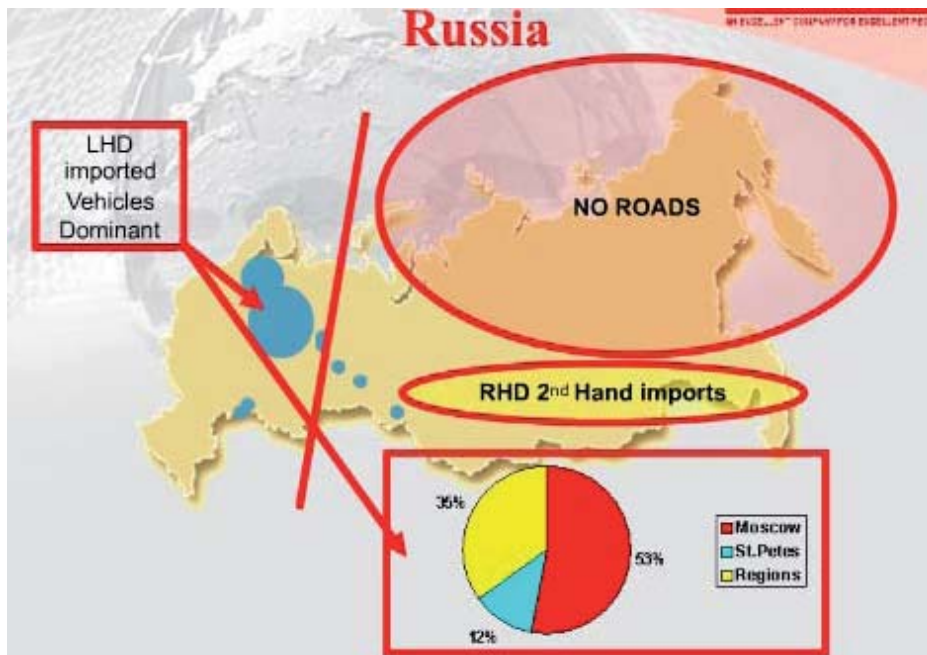
Das Durchschnittsalter des Autobestands in Russland lag Mitte 2009 bei 11,5 Jahren, wobei es hier erhebliche regionale Unterschiede gibt (siehe nachfolgende Tab.).

Tab. 12: Durchschnittsalter des Automobilbestands in Russland nach Regionen

Region der Russischen Föderation	Durchschnittsalter des Autobestands (Jahre)
Gebiete mit dem geringsten Durchschnittsalter:	
.Region Perm, Republik Tatarstan	8,9
.Stadt Moskau, Gebiet Samara	9,1
.Gebiet Wologda	9,6
.Republik Udmurtien	9,7
.Sankt Petersburg	9,8
.Gebiete Moskau, Tjumen und Tscheljabinsk	knapp über 10
Gebiete mit dem höchsten Durchschnittsalter:	
.Gebiet Kaliningrad	15,0
.Region Kamtschatka	15,2
.Gebiet Sachalin	15,9
.Gebiet Amur	15,9
.Region Primorje	16,0
.Gebiet Magadan	16,4

Quelle: AwtoStat (Studie vom August 2009)

Abb. 16: Verteilung des Fahrzeugbestands in Russland



Legende: LHD = Left Hand Drive Cars

Quelle: Jeremiah 2008

Die regionale Verteilung ist auch für das Kat-Recycling bedeutsam, da in den jüngeren Fahrzeugbeständen der Kat-Anteil und der PGM-Gehalt je Kat größer ist.

Generell nimmt der Bestand an importierten neuen und gebrauchten Fahrzeugen zu. 37,2% des Gesamtbestands in Russland waren Mitte 2009 schon ausländische Modelle, dies sind entweder importierte Fahrzeuge oder in Russland montierte Fahrzeuge ausländischer Marken.

Unter den ausländischen Modellen im Schnitt am ältesten sind Fahrzeuge von Isuzu (Kleintransporter), Audi, Volkswagen und Mercedes-Benz. Das liegt daran, dass viele deutsche Autos bereits in den 1990er Jahren als junge Gebrauchte über das damals intensive Kfz-Import-Geschäft nach Russland eingeführt wurden. Bei diesen älteren Fahrzeugen ist der Ersatzteilbedarf hoch. Gegenwärtig auf dem Gebrauchtwagenmarkt am beliebtesten sind Automobile der C-Klasse wie Mazda 3, Ford "Focus", Mitsubishi "Lancer" und der D-Klasse wie Ford "Mondeo", Honda "Accord" und Mazda 6.

Tab. 13: Durchschnittsalter des Fahrzeugbestands nach Marken (2009)

Ausländische Marken	Durchschnittsalter (Jahre)	Russische Marken	Durchschnittsalter (Jahre)
Isuzu	16,5	Moskwitsch	17,0
Audi	14,6	ZAZ	17,0
Saab	14,1	UAZ	14,0
Alfa Romeo	13,8	GAZ	13,4
Daihatsu	13,3	Lada	12,3
Volkswagen	12,8		
Mercedes-Benz	12,5		
Lexus (Toyota)	4,9		
Porsche	4,8		
Land Rover	4,7		
Renault	4,5		
Kia	4,0		
Hyundai	3,7		
Chevrolet	3,0		
Iran Khodro	2,4		
Chinesische Marken (Chery, Geely)	2,0		

Quelle: Awtostat, Automobilbestand in den russischen Regionen (2009)

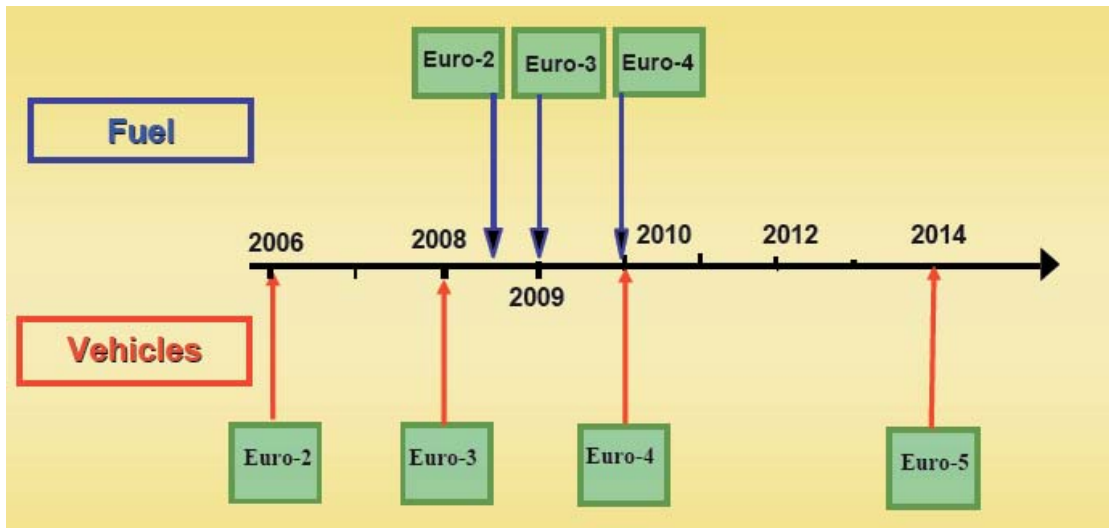
Zur Modernisierung dieses Bestandes wird in den nächsten Jahren auch die Umweltpolitik beitragen, wenn strengere Emissionsgrenzwerte für die Fahrzeuge eingeführt werden. Von 2006 bis 2014 sind für die Zulassung von Neuwagen folgende Emissionsklassen geplant.

Die Verkaufszahlen für Pkw setzten sich 2007 wie folgt zusammen (European Bank 2008, S. 7):

- 27 % Russische Marken
- 16 % Ausländische Marken in Russland produziert
- 43 % Importe neuer Fahrzeuge (ausländische Marken)
- 14 % Importe gebrauchter Fahrzeuge (ausländische Marken)

Durch den geringen Anteil russischer Marken an den Verkaufszahlen nimmt Jahr für Jahr der Bestand an importierten neuen und gebrauchten Fahrzeugen kontinuierlich zu. 37,2% des Gesamtbestands in Russland waren Mitte 2009 schon ausländische Modelle.

Abb. 17: Einführung von Emissionsstandards in Russland



Quelle: Scientific and Research Institute of Motor Transport (NIIAT)

Ähnlich wie in Westeuropa sollen diese Normen durch Anreize bei der Kraftfahrzeugsteuer und der Autoversicherung flankiert werden.²⁰

Aufgrund fehlender statistischer Angaben kann dies jedoch nicht umfassend nachvollzogen werden. Basierend auf einem Expertengespräch mit Yuri Kunin von der GIBDD (State Inspection for Road Traffic Safety) konnten folgende Erkenntnisse gewonnen werden.²¹ Das Scientific and Research Institute of Motor Transport (NIIAT, ecotrans@niiat.ru) hat eine Untersuchung über die Erneuerung von Fahrzeugbestand und die Einführung EURO Norm in Russland durchgeführt. Hieraus ist zu entnehmen, dass am Ende 2008 37% der Pkw mit Otto-Motor mit einem Kat ausgerüstet waren. Dieser Prozentsatz ist ein Mittelwert. So ist in den großen Städten Russland der Anteil der Fahrzeugen mit dem Kat-Ausrüstung viel höher, z.B. in Moskau sind es 73%. Im Zusammenhang mit dem Zeitplan für die Einführung der EURO-Normen in Russland und dem Programm für Altautorecycling wird in der Zukunft die Zahl von Autos mit Kats weiter anwachsen und bis 2020 ist voraussichtlich der gesamte Fahrzeugbestand mit Kats ausgerüstet. Diese Werte liegen bereits deutlich über den Angaben von Donchenko (o.J., 23) der für 2006 ermittelte, dass noch über 80% der russischen PKW-Flotte nicht die EU-Abgasnormen erfüllen.

²⁰ Die Verordnung der Russischen Föderation „Über die Änderungen in den Versicherungstarifen OSAGO, erhöht den Koeffizienten der Versicherungstarife für über zehn Jahre alte Fahrzeuge um 1,5.

²¹ Mitteilung von Irina Sokolova vom 4.01.2010

Trotz dieser Defizite kann das technische Recyclingpotenzial im Gesamtbestand für PGM bereits auf über 17t geschätzt werden²².

Ein weiterer Modernisierungsimpuls des Fahrzeugbestandes ging von der staatlichen Abwrackprämie aus, die nach längerer öffentlicher Debatte 2009 nach westeuropäischem Vorbild eingeführt wurde, um die Konjunktur und den Fahrzeugabsatz anzukurbeln. Hierzu wurde eine Verordnung der Russischen Föderation „Über die Genehmigung der Regeln für die Auszahlung einer Prämie in Höhe von 40.000 Rubel²³ für die Verschrottung von über zehn Jahre alten Fahrzeugen auf Kosten des föderalen Budget im Zeitraum von 2009 bis 2011“ erlassen. Die Regierung stellt für die Abwrackprämie insgesamt zehn Mrd. Rubel bereit.

Der Ablauf sah wie folgt aus: Besitzer von über zehn Jahre alten einheimischen oder importierten Fahrzeugen, die seit mindestens einem Jahr auf den Letzthalter zugelassen sind, erhielten einen Gutschein im Wert von etwa 1.100 Euro, wenn sie ihr Fahrzeug bei einem speziellen Verwertungszentrum verschrotten lassen. Der Gutschein konnte dann beim Kauf eines neuen Automobils aus russischer Produktion, einschließlich in Russland montierter Fahrzeuge ausländischer Marken, eingelöst werden.

Das Abwrackpilotprojekt wird nur in wenigen Regionen Russlands und in Moskau durchgeführt: im Moskauer Gebiet, Sankt Petersburg und im Gebiet Leningrad, sowie Samara und Nischni Nowgorod. Zur gleichen Zeit soll die Entwicklung von umfassender Infrastruktur für das Autorecycling begonnen werden. Insgesamt soll das Programm bis 2013 laufen.

Das Ziel der Abwrackprämie ist damit eindeutig, den Absatz in Russland hergestellter Fahrzeuge anzukurbeln. Da inzwischen die meisten europäischen Fahrzeughersteller Montagewerke in Russland unterhalten, wurden auch diese Marken begünstigt, der Import von ausländischen Neuwagen ging demgegenüber aber 2010 zurück. Ein Effekt der Abwrackprämie war die Verjüngung und Modernisierung des Fahrzeugbestands. Insgesamt wurde der Fahrzeugabsatz 2010 gegenüber 2009 erheblich gesteigert. 2009 und 2010 wurden 400.000 Entsorgungszertifikate ausgestellt und 380.000 Kaufverträge abgeschlossen (siehe nachfolgende Abb.).

²² Die Berechnung geht davon, dass sich die Hubraumklassen analog zu Deutschland verteilen, genaue Zahlen zu Russland liegen leider nicht vor.

russland). Nach Angaben der Industrie-Experten werden landesweit nur 15 bis 20% der offiziell stillgelegten Kfz verwertet (Awtostat, 2009).

Vielfach werden die Altfahrzeuge, Karosserien und Autoteile illegal in Hinterhöfen, an Straßenrändern, auf abgelegenen Plätzen oder auf „wilden Müllkippen“ entsorgt und führen somit zu erheblichen Umweltbelastungen. Bei technischen Reparaturen werden die schrottreife Autoteile wie Reifen, Batterien, Glas, Metall, Kunststoffzeugnisse eingesammelt und Altöle und andere Flüssigkeiten separiert. Die Materialien und noch verwendbare Ersatzteile werden verkauft, die restlichen Materialien in der Regel auf Deponien abgelagert.

Um den Problemen Herr zu werden, sind in den großen Städten die Behörden dazu übergegangen, besitzerlose Kfz einzusammeln und zu speziellen Sammelplätzen zu bringen, wo sie nach zwei Monaten Wartezeit und ohne eine Meldung an den Besitzer entsorgt werden.

In den großen Städten haben sich inzwischen auch private Verwerter etabliert, die sich auf die Demontage von Katalysatoren von PS-starken Fahrzeugen und Luxuskarossen konzentrieren, da diese das größte PGM-Potenzial aufweisen (Rosinenpickerei). So sind It. Vereinigung Automobilhersteller Russland im Bezirk Moskau rund 130 Unternehmen mit dem Altfahrzeug-Recycling beschäftigt. Nach Aussagen von Malkow (2009) wird ein Teil der gewonnenen PGM-haltigen Coats über die baltischen Staaten nach Westeuropa exportiert. EMP-Recycling (Celiapinas 2009) hat in einem Telefonat entsprechende Aktivitäten bestätigt (ohne nähere Einzelheiten darzulegen). Durch diese Aktivitäten wird aber nur ein Teil des Potenzials erfasst. Insbesondere die Kats von kleineren Fahrzeugen gelangen in die Schredderbetriebe oder im Eisenschrott und gehen damit für den PGM-Stoffkreislauf verloren.

Initiativen der Regierung der Russischen Föderation zur Veränderung der Recyclingpraxis

Inzwischen sind auf der politischen Ebene folgende Initiativen gestartet worden, um einen gesetzlichen Rahmen für die Altfahrzeugentsorgung zu schaffen.

- Mandat der Regierung der Russischen Föderation vom 28.05.2009 über die Vorbereitung eines Programms für ein Modellprojekt zur Verwertung von Kraftfahrzeugen im Zeitraum von 2010 bis 2011 unter Berücksichtigung der bestehenden Gesetzgebung;
- Die Ausarbeitung und Verabschiedung eines neuen, föderalen Rechtsrahmens für das Recycling von Altfahrzeugen in Russland, darunter auch das Gesetz „Über die Verwertung der Kraftfahrzeuge und ihrer Bestandteile“; ähnlich wie in Deutschland wird von einer Produktverantwortung der Hersteller ausgegangen und der Letztbesitzer nicht mit den Kosten der Entsorgung belastet.

- Die Verabschiedung des Erlasses des Präsidenten „Über die Maßnahmen der Erneuerung der Kfz-Technik in der Russischen Föderation“; Dieser Erlass bezieht sich vor allem auf die Betriebssicherheit und deren Kontrolle.

In Anbetracht der zuvor genannten Probleme (fehlende Gesetzgebung und Infrastruktur, geringes Umweltbewusstsein) wird es Jahre dauern, ein effektives und umweltschonendes Recyclingsystem aufzubauen. Die Durchsetzung der Rechtsnormen bedarf einer effektiven Umweltverwaltung und enormer Lern- und Qualifizierungsprozesse bei der ausführenden Industrie.

3.5.1.3 Produktion und Recycling von Katalysatoren

Die Analyse von Produktion und Recycling von Katalysatoren muss in Russland der Tatsache Rechnung tragen, das Russland mit einem Anteil von 44 % an der Weltförderung größter Palladiumproduzent und mit 13 % der zweitgrößte Produzent von Platin ist. Hieraus ergibt sich eine andere strategische Ausgangssituation hinsichtlich der Verfügbarkeit des primären Ausgangsmaterials und der Notwendigkeit eines verstärkten PGM-Recyclings. Das Motiv der strategischen Rohstoffsicherung spielt bei der Stoffstromsteuerung eine zentrale Rolle, der Handel mit neuen und gebrauchten Katalysatoren unterliegt daher restriktiven Handelsvorschriften. Gleichzeitig ist Russland ein wachsender Markt für die Ausstattung der Fahrzeuge mit Katalysatoren. Beider Faktoren dürften eine große Rolle gespielt haben, als sich Johnson Matthey 2008 entschieden hat, die Produktion von Katalysatoren im Rahmen eines Joint Ventures mit der JSC "Krastvetmet" The Gulidov Krasnoyarsk Non-Ferrous Metals Plant in Russland aufzunehmen. Die größten Abnehmer dieser Produkte sollen in Russland angesiedelte Autohersteller werden. Das Unternehmen beabsichtigt, 40% des russischen Katalysatoren-Nachfrage abzudecken. Die Kapazität der Anlage beträgt bis zu 1 Mio. Katalysatoren pro Jahr. Die PGM-Rohstoffe für die Produktion werden durch die JSC «Krastvetmet» geliefert.

Ein weiterer Hersteller von Autokatalysatoren für den russischen Markt ist die Automotive Emission Catalyst Units Production Facility. Für die Produktion werden die Rohstoffe von der JSC «Krastvetmet» geliefert. Im Unterschied zum britischen Unternehmen werden aber auch gebrauchte Katalysatoren verwendet.

Diese Unternehmen sind als Schlüsselakteure für ein spezifisch russisches PGM-Stoffstrommanagement anzusehen. Von der nationalen Kat-Produktion geht auch eine starke Nachfrage nach sekundären PGM-Materialien aus. Aufgrund dieser Strukturen spricht vieles dafür, dass sich das sekundäre Stoffstrommanagement in Russland im Wesentlichen im nationalen Rahmen abspielen und das internationale Stoffstrommanagement eine geringere Bedeutung erlangen wird.

Recycling von Katalysatoren

Wie bereits dargestellt, ist insbesondere durch die Modernisierung des Fahrzeugbestandes der Anteil der Fahrzeuge mit Kat-Ausrüstung gestiegen. Von daher kommt der Rückgewinnung von PGM aus Autokatalysatoren eine wachsende Bedeutung zu. Der gegenwärtige Umfang des Kat-recyclings kann nicht beurteilt werden, da hierzu keinerlei statistische Angaben vorliegen.

In der Industrie existiert ein institutionalisiertes System für die sekundäre Rückgewinnung von PGM, beispielsweise für chemische Prozess-Katalysatoren, Refining – Katalysatoren, elektronischen Geräten, Schmuck, alten Thermoelementen, Tiegeln und anderen Geräten. Vor allem das russische Militär und die militärischen Zulieferindustrien besitzen großen Mengen von PGM.

Demontage und Separierung von Autokats erfolgt aufgrund fehlender Durchführungsvorschriften nach rein ökonomischen Kriterien. Die Hauptakteure der Kat-Redistribution sind private Unternehmen. So konnten beispielsweise im Bezirk Moskau 3 Unternehmen identifiziert werden, die sich auf die Entmantelung von Katalysatoren spezialisiert haben. Bisher waren die ökonomischen Anreize gering, da der PGM-gehalt der Katalysatoren niedrig war und viele Katalysatoren Beschädigungen aufwiesen. Aufgrund dessen werden auch viele Katalysatoren nicht demontiert und landen im Schredder. Ein gewisses Aufkommen resultiert auch aus dem Austausch defekter Katalysatoren.

Ein Schlüsselakteur im Bereich der PGM-Verwertung aus Autokats ist die Firma Interpolihim. Der Unternehmensstandort befindet sich in der Region Moskau. Die gebrauchten Katalysatoren werden von Werkstätten und Entsorgungsunternehmen aufgekauft und zum Unternehmen gebracht. Interpolihim verfügt über eine eigene Anlage für die Rückgewinnung von PGM aus gebrauchten Katalysatoren. Die Technologien für die PGM-Rückgewinnung sind hydro- und pyrometallurgische Verfahren, Elektrolyse und Sorption.

Seit der Inbetriebnahme (2005-2008) wurden 700 kg PGM aus verschiedenen Quellen zurück gewonnen.

Für das Jahr 2008 wurden für den Kat-bereich folgende Zahlen genannt:

- Gekaufte Katalysatoren – 25 t;
- Zurückgewonnene PGM – 50,2 kg: Pt – 20 kg, Pd – 28 kg, Rh – 3 kg.
- Durchschnittsgehalt von PGM für 1 kg Kat beträgt 4g.

Geografisch gesehen erstreckt sich das Einzugsgebiet der Firma auf das gesamte ehemalige Territorium der UDSSR. Die wichtigsten Märkte sind Russland (Wladiwostok, Nowosibirsk, Rostow, St. Petersburg, Moskau) und seine Nachbarländer – Belarus, Ukraine, Kirgisien und Kasachstan. Die Firma steht in Konkurrenz zu allen Edelmetallhüttenwerken – wie z.B. Joint Stock Company Ural Electrochemical Integrated

Plant (UEIP) – die auch prinzipiell in der Lage sind aufbereitetes sekundäres PGM zu verarbeiten.

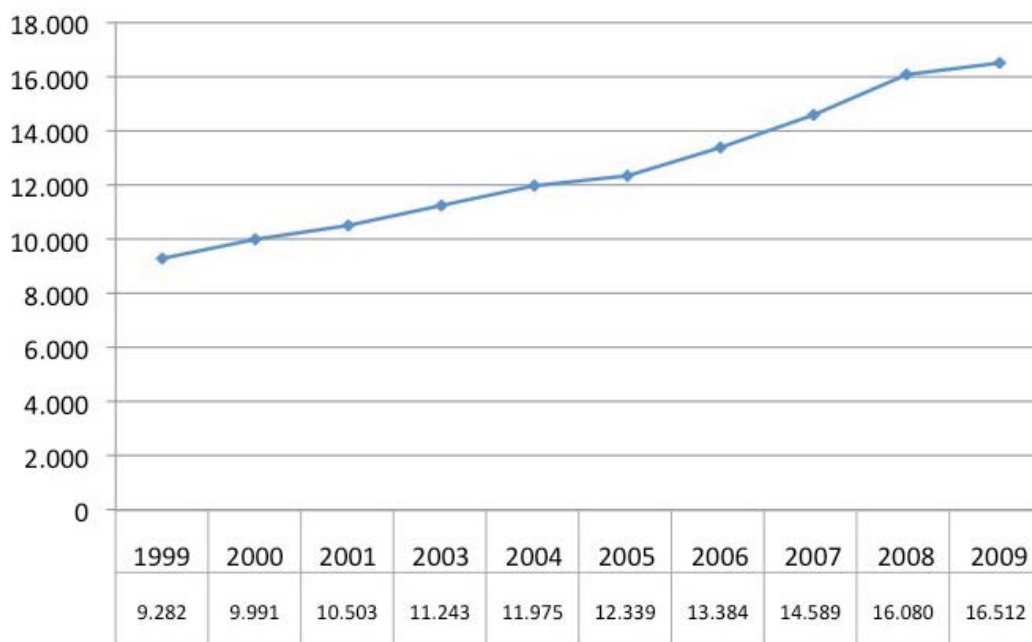
Die rückgewonnenen PGM-Materialien verbleiben größtenteils in Russland, da der Handel und die Ausfuhr von PGM erheblichen Restriktionen unterliegt (wie generell der Handel mit Edelmetallen).

3.5.2 Polen

3.5.2.1 Fahrzeugbestand

Der Fahrzeugbestand Polens ist seit 1999 kontinuierlich gestiegen und hat sich seitdem nahezu verdoppelt.

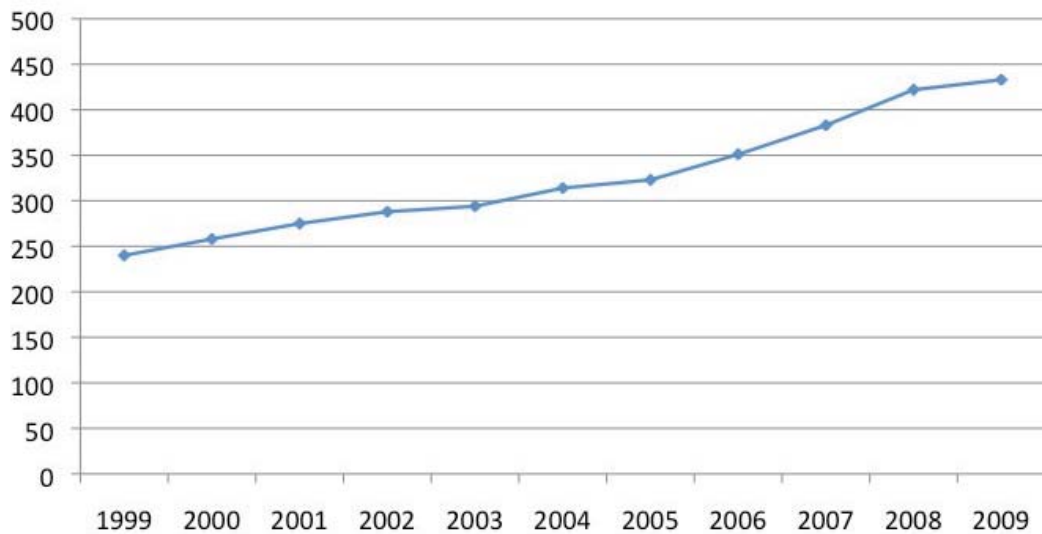
Abb. 19: Entwicklung des Fahrzeugbestandes (Pkw) in Polen (in 1000 Einheiten)



Quelle: Eigene Darstellung nach Database of Central Statistical Office, Warsaw., Anfac 2010, Website Eurostat

In Polen hatte im Jahr 2009 bei einer Bevölkerungszahl von knapp 40 Mio. fast jeder zweite Einwohner ein Auto (433 Pkw pro 1.000 Einwohner) (Abb. 20).

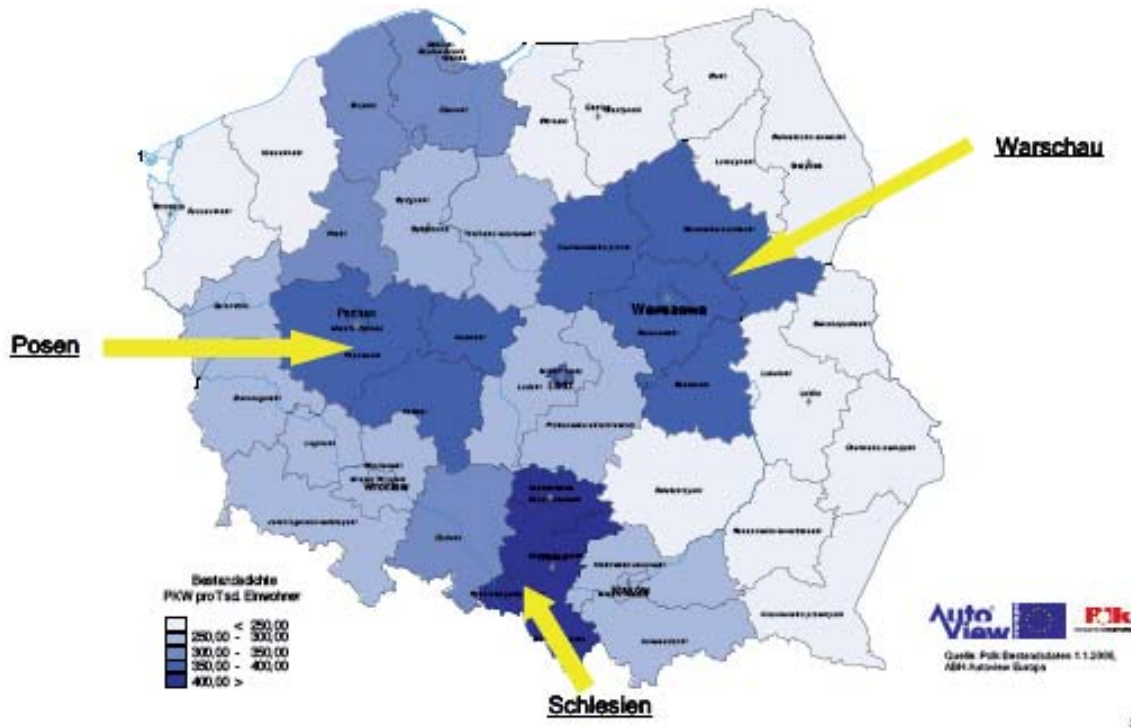
Abb. 20: Fahrzeugbestand (Pkw) pro 1000 Einwohner in Polen



Quelle: Eigene Darstellung nach Website Eurostat

Die räumliche Verteilung des Fahrzeugbestandes ist allerdings sehr unterschiedlich, wie die nachfolgende Abb. zeigt. Die regionalen Unterschiede wirken sich auch auf die Altfahrzeugverwertung aus. In Regionen, in denen eine hohe Bestandsdichte existiert, besteht auch ein höherer Bedarf an entsprechenden Entsorgungskapazitäten.

Abb. 21: Regionale Unterschiede in der Pkw-Bestandsdichte in Polen

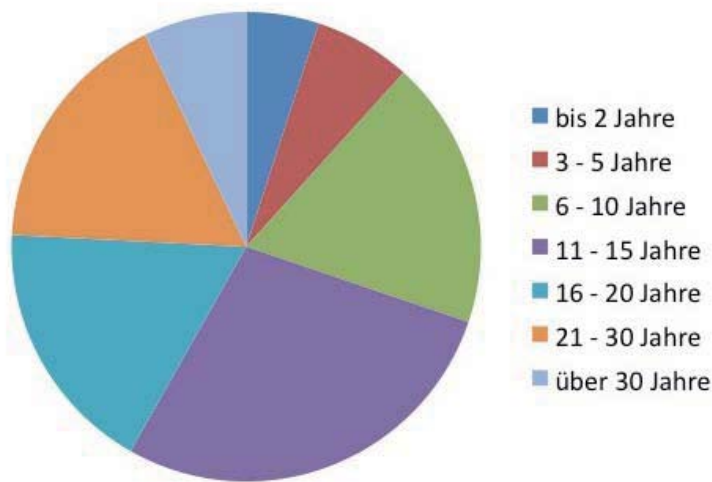


Quelle: abh 2007, S. 11

Mehr als 40 % aller Fahrzeuge sind älter als 15 Jahre (Abb. 22). Die Struktur des Fahrzeugbestandes ist im Vergleich mit Deutschland deutlich überaltert.

Der Anteil von Dieselfahrzeugen erhöht sich mit jedem Jahr.

Abb. 22: Altersstruktur von Pkw in Polen in 2009

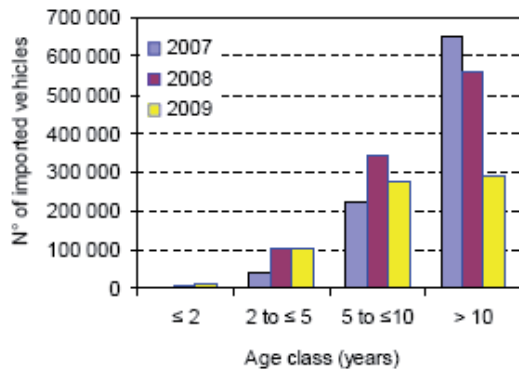


Quelle: Eigene Darstellung nach Central Statistical Office Poland 2010: 136

Aufgrund der starken Überalterung des Fahrzeugbestandes gibt es noch einen erheblichen Anteil von Fahrzeugen, die nicht mit einem Katalysator ausgestattet sind. Erfolgt eine sukzessive Entsorgung der Fahrzeuge entsprechend der Altersstruktur, so ergeben sich in Polen zunächst geringere PGM-Potenziale, die zu erschließen wären, als dies bei jüngeren Beständen der Fall wäre.

Durch die Gebrauchtwagenimporte aus Westeuropa und Deutschland wird die Vergütung des Fahrzeugbestands verlangsamt. So waren nach Angaben von abl (2007) 56 % der eingeführten VW-Fahrzeuge älter als 10 Jahre. VW und Opel sind die Marken, die nach Polen am häufigsten eingeführt werden (vgl. ebd.). Allerdings gibt es einen Trend zur deutlichen Verjüngung dieser Importe, wie die nachfolgenden Abb. zeigt.

Abb. 23: Altersstruktur der nach Polen importierten Fahrzeugen, 2007 bis 2009



Quelle: Mehlhart et al. 2011

Die in Polen wieder angemeldeten Fahrzeuge aus Importen umfassen folgende Anteile bei den Neuregistrierungen der Fahrzeuge (Tab. 14).

Tab. 14: Aus Deutschland exportierte und in Polen wieder zugelassene Fahrzeuge und ihr Anteil an den Neuregistrierungen

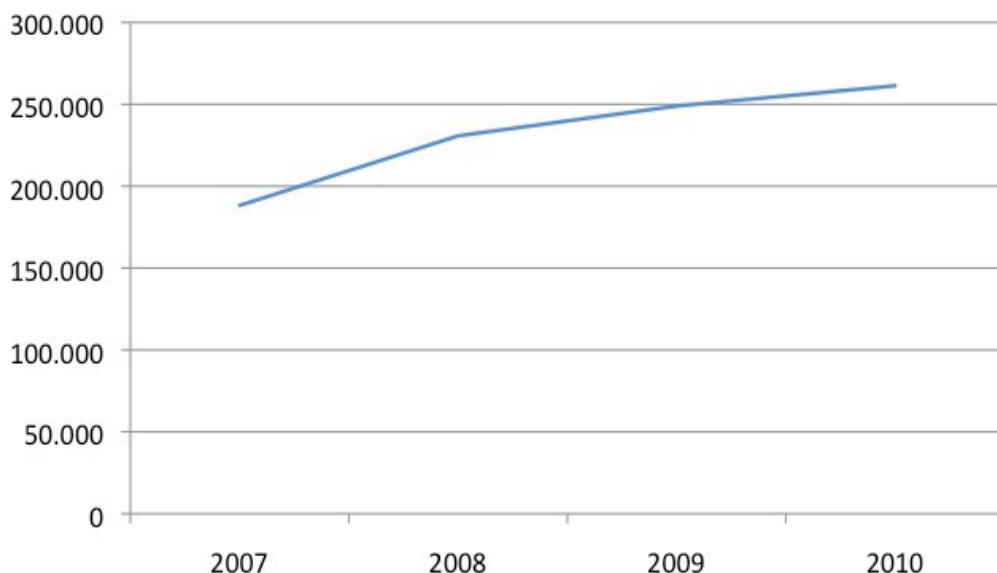
	2006	2007	2008	2009
Zugelassene Importfahrzeuge	638.581	716.409	702.030	425.686
Neuregistrierungen (gesamt)	923.783	1.128.684	1.280.633	864.295
Anteil der Importfahrzeuge an den Neuregistrierungen in Prozent	69,13	63,47	54,82	49,25

Quelle: KBA Jahresberichte 2007, 2008, 2009, 2010; Website Eurostat; eigene Berechnungen

Es ist zu erkennen, dass die Bedeutung der Importe für den Fahrzeugbestand tendenziell abnimmt und in 2009 aber immerhin noch die Hälfte der neu zugelassenen Fahrzeuge umfasst. Auch wenn die Importe viele Fahrzeuge umfassen, die älter als 10 Jahre sind, so sind diese jedoch mit einem Katalysator ausgerüstet. Durch die lange Nutzungsdauer kann jedoch die Funktion des Katalysators beeinträchtigt werden.

Die Fahrzeuglöschungen sind ein Indikator für das mögliche Entsorgungsvolumen in der Altfahrzeugverwertung. Aufgrund der in der Abb. 22 dargestellten Werte wird deutlich, dass hier in Zukunft zusätzliche Kapazitäten aufgebaut werden müssen.

Abb. 24: Anzahl abgemeldeter Fahrzeuge im Jahr



Quelle: CEPIK, 28.03.2011

Im Vergleich der Neuregistrierungen mit den Abmeldungen ist zu erkennen, dass sich das Wachstum des Bestandes abschwächt. Über die Zusammensetzung der Abmeldungen liegen keine Informationen vor.

3.5.2.2 Rechtliche Rahmenbedingungen Altfahrzeug-Recycling/PGM-Rückgewinnung

In Polen wurde die Altfahrzeug-Richtlinie 2000/53/EG durch mehrere Verordnungen und Gesetze umgesetzt:

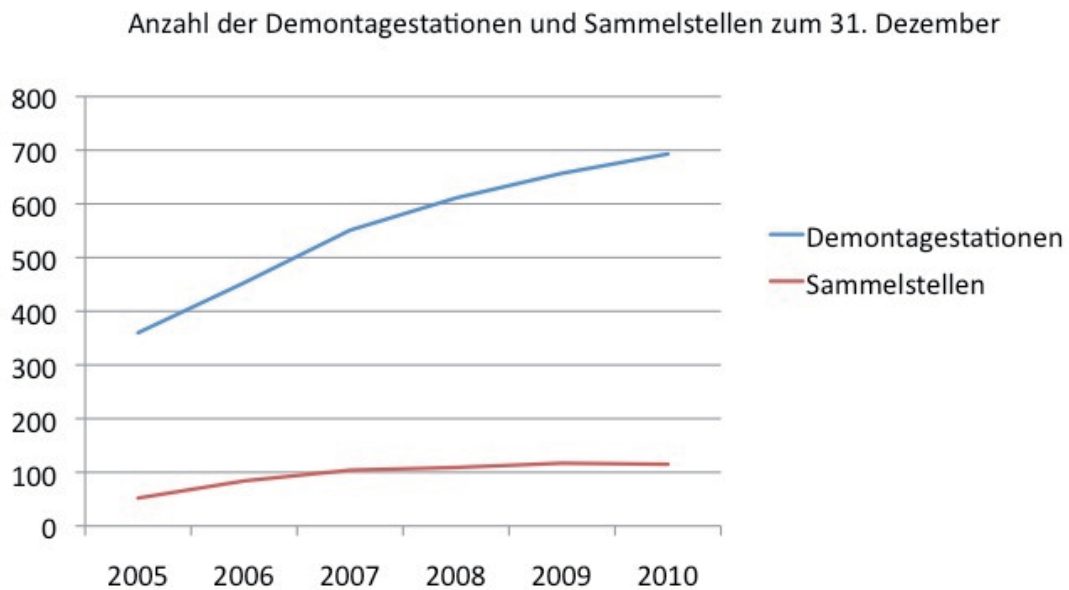
- Decree of 27th April 2001 on waste
- Decree No. 25/202 of 2005 on the recycling of ELV
- Decree No. 143/1206 of 2005 on the collection of ELV
- Decree No. 2/9 of 2006 on material coding standards

Die wichtigste Grundlage für die Umsetzung der EU-Altfahrzeug-Richtlinie 2000/53/EG in das polnische Rechtssystem ist das "Gesetz über das End-of-Life Vehicles Recycling" von 2005.²⁴ Durch dieses Gesetz sind die Unternehmen, die Entsorgungs- und Recycling-Dienstleistungen bereitstellen, seit dem 1. Juli 2005 verpflichtet, eine Ge-

²⁴ End-of life vehicles, http://www.mos.gov.pl/kategoria/2209_end_of_life_vehicles/, 26.10.2009

Genehmigung für ihre Tätigkeit einzuholen. Die Genehmigung wird von der Abteilung für Umwelt und Landwirtschaft der jeweiligen Woiwodschaft erteilt (Regionalverwaltung). Die Gesetzgebung erlaubt zusätzlich zu den Demontage-Stationen die Einrichtung von Altfahrzeug-Aannahmestellen (durch den Handel). Die Anzahl beider Einrichtungen haben in den letzten Jahren zugenommen (Abb. 25).

Abb. 25: Anzahl der Demontagestationen und Sammelstellen zum 31. Dezember



Quelle: FORS, 14.03.2011

Nach der polnischen Gesetzgebung soll der Katalysator bei der Altfahrzeug-Entsorgung demontiert und das Katalysatorgewicht und das Altfahrzeuggewicht dokumentiert werden.

Die polnische Gesetzgebung sieht des Weiteren vor, dass auf dem polnischen Markt Fahrzeugteile, die vor dem 1. Juli 2003 hergestellt wurden, aufgrund der Schwermetallbelastung nicht gehandelt werden dürfen (CBI, 2007). In Polen gibt es keine eigene Gesetzgebung für die Katalysatorenbehandlung. Allerdings fallen die Katalysatoren unter die Regelungen der allgemeinen Abfallwirtschaft und des Altfahrzeug-Recyclings.

Zur Modernisierung des Altfahrzeugrecyclings gewährt der Nationale Fond für Umweltschutz und Wasserwirtschaft in Polen Vorzugskredite und Zuwendungen an Firmen, die sich mit Fahrzeugrecycling beschäftigen.

Branchenvertreter beklagten in der Vergangenheit öffentlich die Zweckentfremdung dieser Mittel für internationale Umweltkonferenzen.²⁵

Auf der Homepage der FORS sind die staatlichen Zuwendungen für Betriebe und Kommunen, die sich mit der Altfahrzeugentsorgung befassen, wie folgt aufgeführt.

Tab. 15: Auszahlungen aus dem "National Fund for Environmental Protection and Water Management " an Unternehmen und Kommunen

	2005	2006	2007	2008	2009
Anzahl der Betriebe	86	240	394	458	522
Anzahl der Betriebe mit Zuschuss	77	252	249	429	k.A.
Ausgezahlte Beträge Betriebe (tsd. Zloty)	13 657	32472	35286	52014	72427
Ausgezahlte Beträge Kommunen (tsd. Zloty)	1 142	5810	2996	2711	2600

Quelle: http://fors.pl/pliki/kwoty_doplaty.pdf, eigene Übersetzung und tabellarische Gestaltung

Beim Vergleich der Jahreswerte von 2005 bis 2009 wird deutlich, dass Umfang und Breite der Auszahlungen erheblich zugenommen haben.²⁶ Durch dieses Anreizsystem hat sich innerhalb von wenigen Jahren die Anzahl der Betriebe, welche Zahlungen erhalten versechsfacht, entsprechend steigern sich die ausgezahlten Summen.

Die Gesamtsituation des Fahrzeugrecyclings in Polen wird auch im National Waste Management Plan²⁷ für das Jahr 2010 angesprochen. Hier identifiziert die polnische Regierung folgende Probleme im Bereich Altfahrzeug-Recycling:

- unzuverlässige und unvollständige Daten bei der Erfassung des nationalen Fahrzeugbestands in einem zentralen Register;
- Fehlen von zuverlässigen Daten über die Menge von demontierten Fahrzeugen trotz der Arbeit von Inventory of Vehicles and Drivers (CEPiK);
- Noch lückenhaftes Annahmestellennetzwerk für ELV
- Die hohe Anzahl von importierten gebrauchten Fahrzeugen, die sich in einem schlechten Zustand befinden

²⁵ Polish government takes over funds raised for car recycling <http://business.export.by/en/?act=news&mode=view&page=9&id=2104>, 7-07-2008

²⁶ Dies deutet auch auf eine Verbesserung der gesamten Entsorgungsinfrastruktur für Altfahrzeuge hin. Mit der Registrierung der Unternehmen im Fonds sind die grauen Märkte erheblich kleiner geworden. Der Zuschuss ist an Mengenangaben bezüglich der Anzahl der entsorgten Fahrzeuge geknüpft.

²⁷ The 2010 National Waste Management Plan, download http://www.mos.gov.pl/kategoria/2208_the_2010_national_waste_management_plan/31.09.2009

Es wird deutlich, dass die früheren Defizite in der Entsorgung hier keine Erwähnung mehr finden (siehe auch nachfolgendes Kapitel).

Seit der Veröffentlichung des Planes wurden weitere rechtliche Regelungen verabschiedet, um die Situation in Polen zu verbessern. Bisher haben sich die Autohersteller nur in geringem Maße an dem Ausbau des Recyclingnetzwerkes beteiligt. Somit ist der Grundgedanke der Produzentenverantwortung noch schwach entwickelt.

3.5.2.3 Recyclingpraxis

Die Recyclingpraxis entspricht auch heute noch nicht den gesetzlichen Vorgaben. FORS schätzt (Rzeczpospolita online, 3.3.2010), dass von den ca. 800 Demontagefirmen und Annahmestellen immer noch die Hälfte illegale Entsorgung betreibt. Ein Grund dafür sei, dass die entstehenden Kosten nicht durch die staatlichen Zuschüsse abgedeckt werden. Illegal bedeutet in diesem Fall auch, dass die getätigten Umsätze nicht den Steuerbehörden gemeldet werden. Aufgrund dessen spiegeln die offiziellen Statistiken auch nur einen Teil der Realität wieder.

Nach Angaben von Eurostat, die auf Meldungen der Mitgliedstaaten basieren, wurden in Polen im Jahr 2007 171.000 Altfahrzeuge entsorgt, von denen ein Massenanteil von 77 % verwertet wurde (Tab. 16).

Tab. 16: Eckdaten des Altfahrzeuganfalls und der –verwertung in Polen, 2006 und 2007

	Anzahl Altfahrzeuge	Quote für Wiederverwendung und Recycling	Quote für Wiederverwendung und Verwertung
2006	150.987	84,7 %	85,8 %
2007	171.258	72,8 %	77,0 %

Quelle: <http://epp.eurostat.ec.europa.eu/portal/page/portal/waste/data/wastestreams/elvs>, Excel Dateien

Diesen Zahlen bieten nur ein Teil der Realität ab, da hier nur die Altfahrzeuge erfasst werden die legal entsorgt werden. Die Dunkelziffer dürfte in diesen Jahren bei mehr als 50 % liegen- Da gleichzeitig auch noch Mängel der Fahrzeugregistrierung existieren und der Anteil alter gebrauchter Fahrzeuge, die dann wiederum in den Export gehen nicht bekannt ist, existieren zur Bewertung der Situation erhebliche Informationslücken.

Aus diesen Werten können noch keine Rückschlüsse zum Kat-Recycling geschlossen werden, da die Zusammensetzung der entsorgten Fahrzeuge und ihr Alter nicht bekannt sind.

Verwertung von Autokatalysatoren

Die Demontage der Katalysatoren steht im Zusammenhang mit der Altfahrzeugbehandlung. Bisher wird aber der weitere Verwertungspfad nicht explizit geregelt. Auch besteht in den Betrieben nur eine unzureichende Kenntnis über die Entwicklung der Katalysator-Technik. Es gibt daher Bedarf hinsichtlich eines Wissenstransfers über die richtige Demontage und technische Behandlung von Katalysatoren aus Altfahrzeugen.

Mehrere Unternehmen – Zwischenhändler – kaufen und sammeln die Katalysatoren und verkaufen sie dann für die weitere Verwertung an Unternehmen im Ausland, die über eine Edelmetallaufbereitung verfügen (Lewicki 2008, Izdebski, 2009; Fornalczyk, M.; Saturnus M., 2008). “At present in Poland there is no plant where PGM can be recovered. The used auto catalytic converters are purchased, collected and then imported to other countries especially Germany” (Fornalczyk, M., Saturnus M., 2008). Für den grenzüberschreitenden Transport wird eine kostenpflichtige Genehmigung benötigt, allerdings werden die hiermit verbundene Stoffströme nicht erfasst, die Ermittlung einer Recyclingquote auf dieser Basis nicht möglich.

Nach Einschätzung des FORS-Vertreters auf dem Projekt-Workshop in Berlin, wird das Recycling von gebrauchten Katalysatoren sich in dem Maße verbessern, wie das Qualitätsniveau des Fahrzeugrecyclings insgesamt angehoben wird. Voraussetzung hierfür sei, dass die Auszahlungen aus dem Fond an Qualitätssicherungsmaßnahmen und Einhaltung der Umweltauflagen gebunden würden (und nicht nur mengenbezogen erfolgen).

3.5.2.4 Relevante Akteure

Zu den staatlichen Akteuren im Bereich Autorecycling in Polen gehört vor allem das Chief Inspectorate of Environmental Protection/ Główny Inspektorat Ochrony “rodowiska”. Das Hauptziel der Inspektion ist ein besserer Vollzug der Umweltgesetzgebung. Weitere wichtige staatliche Akteure sind das Ministerium für Umwelt und das Ministerium für Wirtschaft. In der Umsetzung und Kontrolle kommt den dezentralen Behörden in den Woiwodschaften eine zentrale Rolle zu.

Die staatlich anerkannten Altfahrzeug-Verwertungs-Betriebe haben sich mehrheitlich im “Polish Car Recycling Forum” (FORS) zusammengeschlossen. Dieser Verband wurde im Jahr 1998 auf Initiative der Mitarbeiter des „Industrial Research Institute for Automation and Measurements“ (PIAP) ins Leben gerufen. Die Mitglieder des Verbandes sind Unternehmer von Demontagebetrieben, Sammelpunkten und Schredderanlagen, aber auch Professoren und Wissenschaftler diverser Universitäten und Institute in Polen.

Heute ist FORS ein landesweiter Verband der Recyclingunternehmen, die sich mit der Altfahrzeugentsorgung befassen. Er hat immer wieder Vorschläge zur Verbesserung und Weiterentwicklung des Entsorgungssystems unterbreitet.

3.5.3 Baltische Länder

3.5.3.1 Fahrzeugbestand

Die Fahrzeugdichte pro 1.000 Einwohner in den drei baltischen Ländern beträgt durchschnittlich 437 Pkws.

Tab. 17: Fahrzeugbestand in baltischen Ländern in 2009

Land	Fahrzeugbestand	Pro 1000 Einwohner
Lettland	905 000	400
Estland	545 600	407
Litauen	1 695 000	506

Quelle: Website Eurostat

3.5.3.2 Rahmenbedingungen ELV-Recycling/PGM-Rückgewinnung

Bezogen auf das Altfahrzeug-Recycling sind die drei baltischen Länder Lettland, Litauen und Estland auf einem ähnlichen Niveau der Entwicklung. Behörden und Ministerien haben die Gesetzgebung für die Umsetzung der Altfahrzeug-Richtlinie 2000/53/EG abgeschlossen.

Im Einzelnen stellt sich dies wie folgt dar:

Lettland – die Altfahrzeug-Richtlinie 2000/53/EG wurde durch mehrere Gesetze einschließlich des Gesetzes „End-of-life Vehicles Management“ vom 22. Dezember 2004 umgesetzt (Website CBI a).

Litauen – die Richtlinie trat im Jahr 2003 in Kraft und wurde definitiv durch die Verordnung No. V-292 von 6. Februar 2006 bekräftigt (Original title: Dėl Lietuvos Respublikos sveikatos apsaugos ministro 2002 m. gegužės 27 d. įsakymo Nr. 239 „Dėl Lietuvos higienos normos HN 36:2002 „Draudžiamos ir ribojamos medžiagos“ patvirtinimo“ pakeitimo - 2006 m. vasario 6 d. Nr. V-292) (Website CBI b).

Estland – die Gesetzgebung für die Umsetzung der Altfahrzeug-Richtlinie 2000/53/EG ist seit dem Jahr 2004 in Kraft (Website Waste Department Ministry of the Environment):

- Estonian Waste Act 2004 - enthält einen generellen Verweis auf die Produktverantwortung der Hersteller

- Regulation of the Government of the Republic (No 352, 13th December 2004) regelt die Anforderungen für Sammlung, Rücknahme, Wiederverwendung und Behandlung von Altfahrzeugen und Ersatzteilen.
- Regulation of the Minister of the Environment (No 89, 8th July 2004), ist eine Durchführungsverordnung für die Altfahrzeugentsorgung (Website CBI c).

3.5.3.3 Recyclingpraxis

Nach Angaben von Eurostat, die auf Meldungen der Mitgliedstaaten basieren, wurden in den baltischen Staaten im Jahr 2007 je zwischen 12.000 und 16.000 Altfahrzeuge entsorgt, siehe Tab. 18.

Tab. 18 Eckdaten der Altfahrzeugverwertung in den baltischen Staaten 2008

	Anzahl Fahrzeug- Abmeldungen 2007	Anzahl Alt- fahrzeuge	Anzahl zertifizier- ter Verwertungs- anlagen	Recycling- quote	Verwer- tungs- quote
Estland		13 843	25	92 %	93 %
Lettland	Max. 18 124	10 968		87 %	89 %
Litauen		19 534	166	85 %	85 %

Quelle für die 3., 5. und 6. Spalte: Website Eurostat

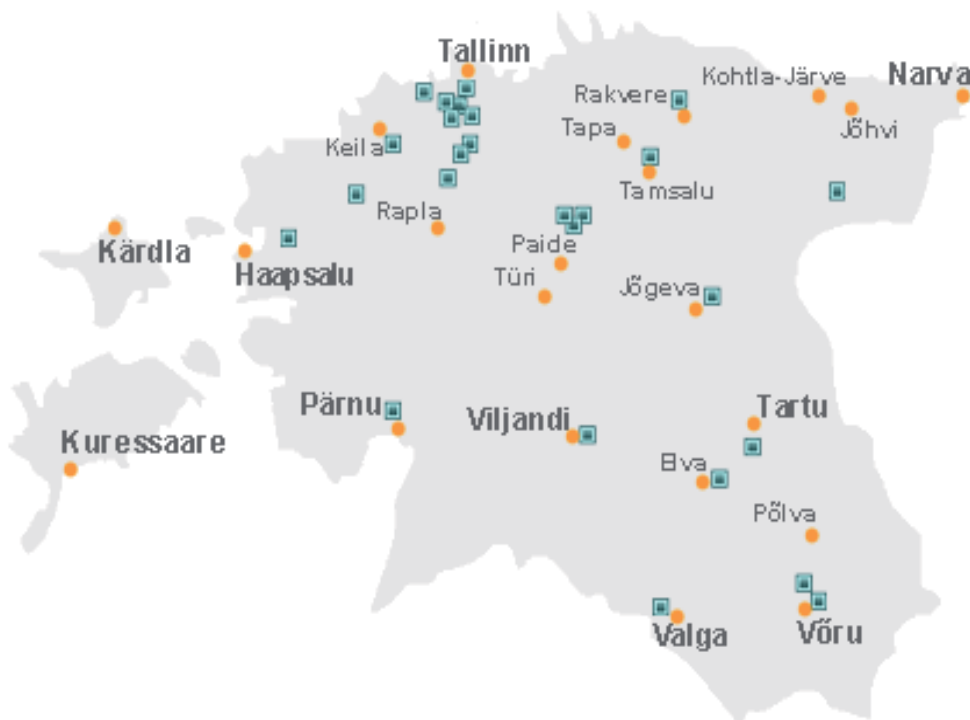
Das ELV- Managementsystem ist in den drei Ländern sehr ähnlich. Die Hersteller sind verpflichtet, die Sammlung und Behandlung von ELV und deren Ersatzteilen zu organisieren. Die Kosten für die Rücknahme, Wiederverwendung und Entsorgung der Altfahrzeuge sollen durch die Hersteller gedeckt werden.

Lettland. Laut der offiziellen Statistik wurden in Lettland im Jahr 2007 18.124 Fahrzeuge abgemeldet. Über 65,5% der Fahrzeuge wurden bei den offiziell zertifizierten Recycling Unternehmen verwertet (Daten von 34 ELV Unternehmen). Die Kfz-Teile (darunter auch die Katalysatoren) werden nach der Demontage nach Westeuropa exportiert (Celiapinas 2009).

Litauen. Derzeit gibt es 166 Annahmestellen (21 Stellen pro 100.000 Einwohner) (EMP 2009). Die Struktur der demontierten Fahrzeuge zeigt, dass 25% der Altfahrzeuge aus Litauen kommen und 75% nur für die Demontage nach Litauen aus den angrenzenden Ländern importiert werden. Die Exporte der Altfahrzeuge kommen aus allen angrenzenden Staaten, auch aus Russland. Hier wirken noch die alten Industriestrukturen der ehemaligen Sowjetunion.

Estland. Das Recycling-System besteht aus nur 25 offiziell registrierten Demontagebetrieben (Report of the Member States on the transposition and implementation of Directive 2000/53/EC on end-of-life Vehicles). Die Unternehmen sind die Mitglieder von "Estonian Association of Automotive Recycling Companies"²⁸.

Abb. 26: Standort der Altfahrzeug-Demontage-Stationen in Estland, Stand: 2006



Quelle: Website Ministry of the Environment Estonia

Nur einige der industriellen Abfallbehandlungsanlagen arbeiten auch im Bereich der Demontage von Altfahrzeugen, um sich beispielsweise Altölen zu widmen. Der Besitzer des Altfahrzeuges erhält, nachdem er sein Altfahrzeug zur Werkstatt gebracht hat, einen Verwertungsnachweis, COD (Certificate of destruction). Nach der Entfernung aller Flüssigkeiten und dem Ausbau wieder verwendbarer Teile wird das Altfahrzeug in der Schredder-Anlage behandelt. Alle Metalle werden entfernt, Eisen und NE-Metalle getrennt. Alle Flüssigkeiten werden im Zementofen verbrannt.

Eine große Schredderanlage wird von dem Unternehmen Kuusakoski AG²⁹ betrieben (mit dem ehemaligen Namen EMEX in Estland). Es ist das größte Metall-Recycling-

²⁸ <http://www.elv.ee/>

²⁹ <http://www.kuusakoski.com/>

Unternehmen in Estland und in der baltischen Region. Die Kuusakoski AG gehört zur Gruppe der Kuusakoski OY mit dem Hauptfirmensitz in Finnland.

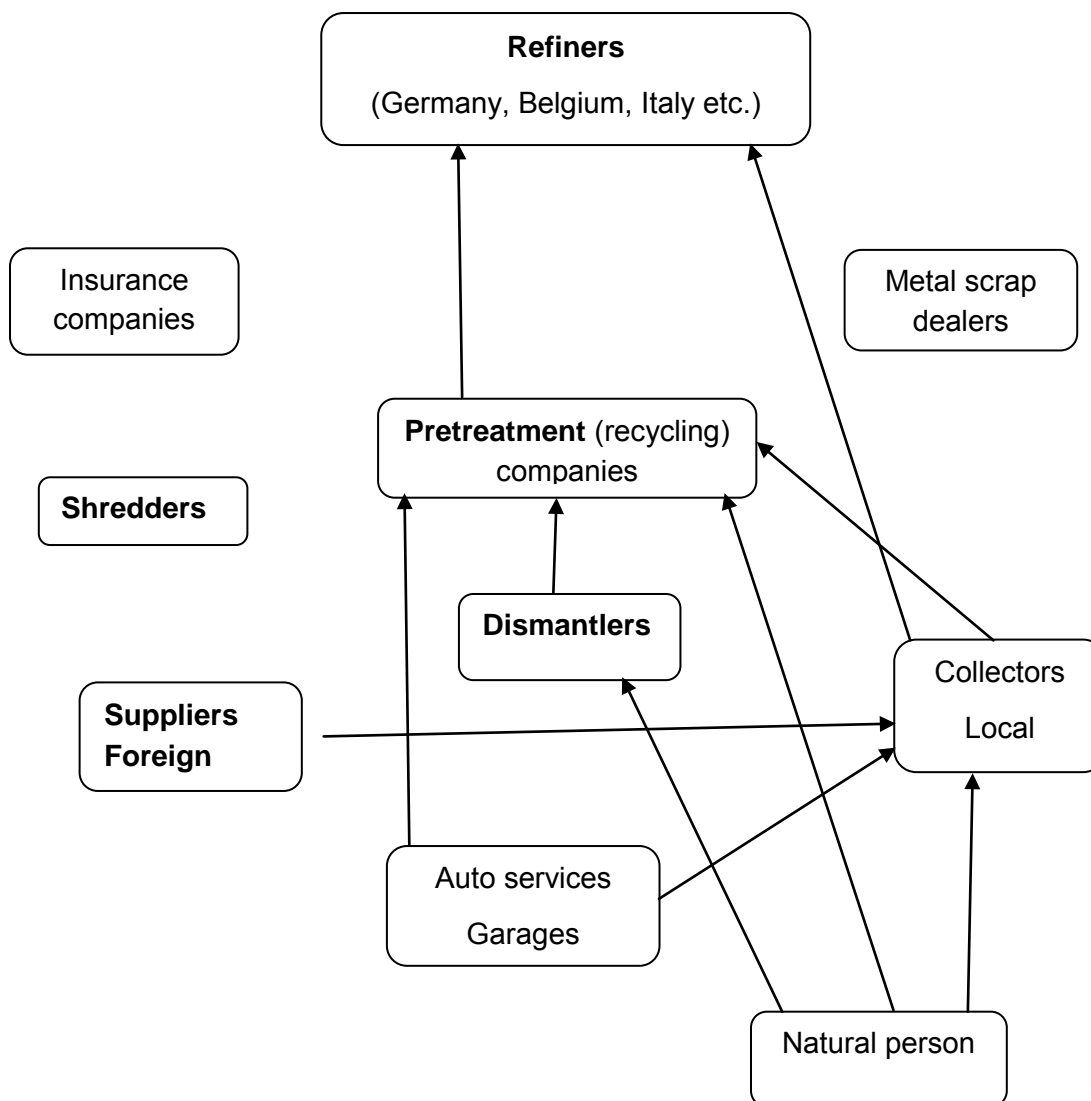
Die Sammelpunkte von Altfahrzeugen sollen so organisiert werden, dass der Besitzer die Möglichkeit hätte das Altfahrzeug nicht weiter als 50 km von dem Wohnort abzugeben. Die Herstellerverantwortung ist am 1. Januar 2006 in Kraft getreten.

Derzeit gibt es keine Regelungen für die Importeure und Hersteller, wie sie ihre Verpflichtungen im Rahmen der Gesetze erfüllen. Das System für die Finanzierung der Altfahrzeug-ELV Behandlung ist bereits konzipiert. Problematisch ist, dass die Entwicklung eines Systems von der Organisation und Zusammenarbeit zwischen den Herstellern abhängt und diese schwer zu koordinieren ist (Website ETC/RWM).

Recycling von Katalysatoren

Das Recycling von Altkatalysatoren findet in den baltischen Ländern nicht komplett statt, da keine Refining-Anlagen für die PGM-Rückgewinnung existieren. In den baltischen Ländern konzentrieren sich die Aktivitäten auf die Sammlung. In der Abb. 21 wird die Handelskette von Altkatalysatoren auf dem baltischen Markt dargestellt. In den baltischen Ländern ist das Recycling von Altkatalysatoren eine vom Altfahrzeug-Recycling unabhängige Branche (Interview EMP, 2009). Die Altkatalysatoren werden von privaten Unternehmen gesammelt (Service-Stationen/Demontage, Autoschrottplätze, Werkstätten, private Personen) und nach dem Trennen des Gehäuses von der Keramikwabe, dem so genannten Decanning, für das Refining ins Ausland verkauft. UAB „EMP Recycling“, ist das größte PGM-Recyclingunternehmen in dieser Region, das die Altkatalysatoren sowohl in den baltischen Ländern Lettland, Litauen und Estland als auch in Polen und Kasachstan sammelt. Das Problem ist, dass die meisten Gebrauchtfahrzeuge, die über das Baltikum importiert werden, keinen Katalysator mehr beinhalten. Die Katalysatoren werden von Zwischenhändlern ausmontiert, wodurch die Gebrauchtwagen ohne Katalysator in den Wiederverkauf nach Russland und den mittelasiatischen Raum gelangen.

Abb. 27: Handelskette von Altautokatalysatoren auf dem baltischen Markt



Quelle: UAB „EMP Recycling“, 2009

3.5.3.4 Relevante Akteure

Administrative bzw. staatliche Akteure sind für die Gesetzesentwicklung und den Vollzug zuständig. Hierzu gehören:

Lettland

Die „Latvian Environmental Protection Fund Administration“ ist eine Institution unter der direkten Kontrolle des Ministers für Umwelt;

Der Fond für Umweltschutz sammelt die Gebühren für die Entwicklung der Recycling Infrastruktur;

Die „Latvian Environmental Agency“ agiert als Monitoring Institut, das die Information der Demontageunternehmen sammelt und die Berichterstattung zur Altfahrzeug-Richtlinie an die europäische Kommission übernimmt;

„Regional Environmental Boards“: Regionale Umweltbehörden, die Genehmigungen erteilen und auch eine Überprüfung der Marktteilnehmer durchführen und die Altfahrzeugverwertungsbetriebe überwachen;

Das Transportministerium ist für die Registrierung/Deregistrierung verantwortlich.

Estland

Das Waste Department des Ministry of the Environment regelt die Vorschriften für das Recycling von Altfahrzeugen in Estland und implementiert die Vorschriften der EU in estnisches Recht. Außerdem vergibt es Lizenzen für die Demontage an estnische Unternehmen (vgl. Website Ministry of the Environment Estonia).

Litauen

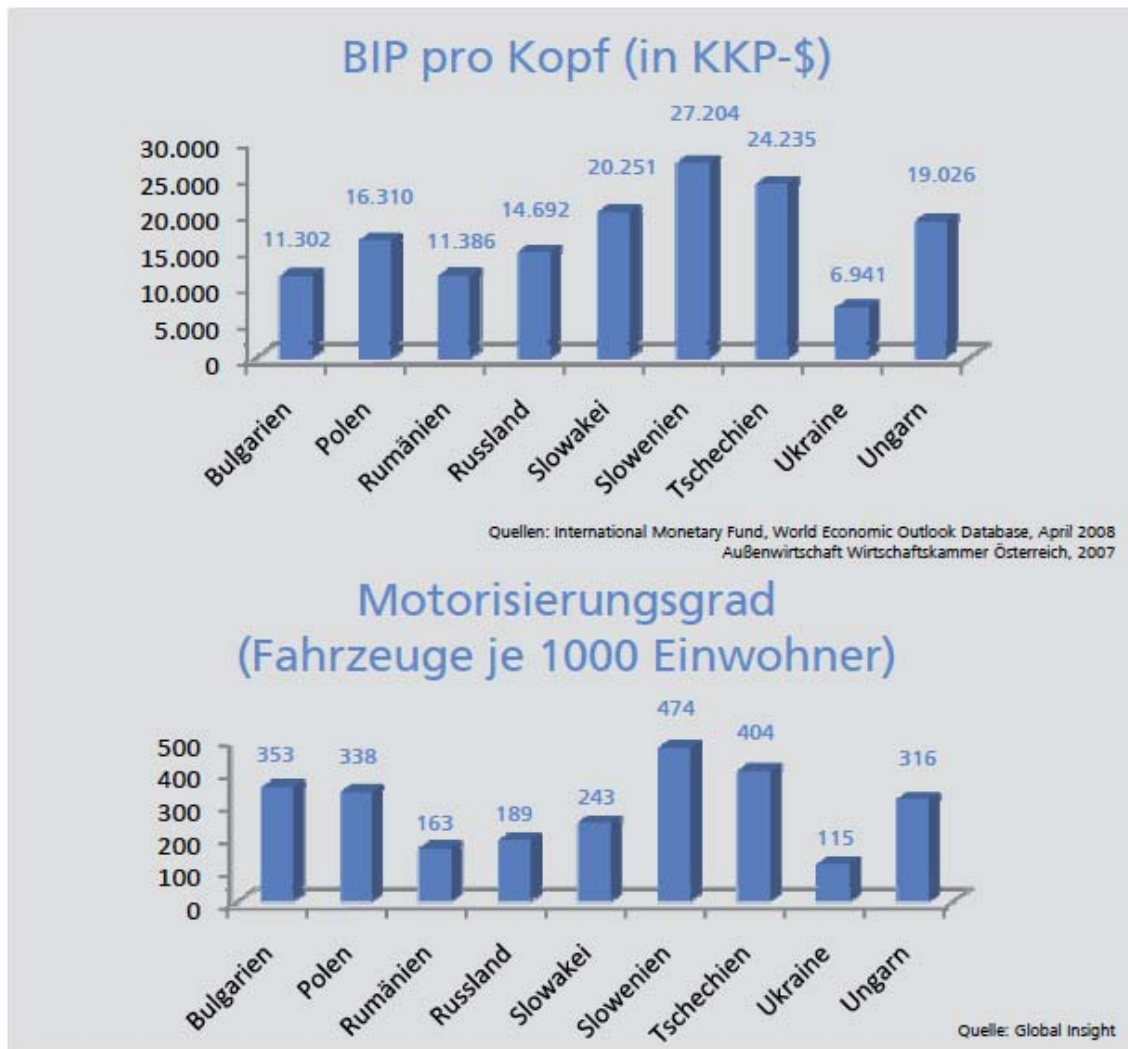
Auch in Litauen regelt das Ministry of the Environment alle Belange des Recyclings von Altfahrzeugen und setzt die EU-Vorschriften, die seit Litauens Beitritt in die EU im Jahr 2004 gelten, in Länderrecht um. (vgl. Website Eionet)

UAB „EMP Recycling“ mit dem Hauptsitz in Vilnius, der Hauptstadt Litauens, hat auch Annahmestellen in Lettland, Estland und Polen. Die wichtigsten Aktivitäten von EMP Recycling umfassen Einkauf, Sammlung, Verwertung und Verkauf von sekundären PGM-Rohstoffen. Nach Angaben von EMP wurden im Jahr 2006 EMP 233 t Katalysatoren verwertet. (vgl. Website EMP)

3.5.4 Abschätzung der zukünftigen Wachstumspotenziale in ausgewählten osteuropäischen Ländern

Zur Abschätzung der Wachstumspotenziale sollen zunächst weitere osteuropäische Länder betrachtet werden (vgl. zu den nachfolgenden Angaben Wolk 2009). Ein wichtiger Wachstumsindikator ist die Pkw-Dichte pro Einwohner. In den „alten“ EU Mitgliedsländern (Beitritt vor dem Jahr 2004) haben von 1.000 Einwohnern 504 einen Pkw. Auf 1.000 Einwohner der „neuen“ EU-Mitgliedsstaaten kommen derzeit jedoch nur 322 Pkw. Der Unterschied zu Russland (19,5% der gesamten europäischen Bevölkerung und 10,2 % des gesamten europäischen Pkw-Bestand) ist noch drastischer. Hier kommen auf 1.000 Einwohner nur 198 Pkw. Nachfolgend wird der Zusammenhang zwischen dem BIP/Kaufkraft pro Einwohner und dem Motorisierungsgrad für ausgewählte Länder dargestellt.

Abb. 28: Zusammenhang zwischen BIP und Fahrzeugdichte pro Einwohner



Quelle: Fraunhofer-Projektgruppe für Produktions- und Logistikmanagement 2009, Folie 14

Im oberen Teil der Abbildung ist die Kaufkraft der Einwohner (gemessen in Kaufkraftparität) abgebildet. Diese entwickelt sich in allen diesen Ländern dynamischer als im EU27-Durchschnitt. Der Motorisierungsgrad ist in Bulgarien auffällig hoch, die geringste Dichte an Autos weisen Russland, Rumänien und die Ukraine auf. Auch diese ländervergleichende Betrachtung bestätigt noch einmal die enorme Bedeutung des russischen Marktes. Der russische Absatzmarkt weist ein enormes Potenzial auf. 60% der Neuwagenverkäufe die untersuchten Länder finden in Russland statt (vgl. ebd.).

Wachstum und Modernisierung des Pkw-Bestandes sind damit Bestandteile des langfristig zu erwarteten wirtschaftlichen Aufschwungs in diesen Ländern. Es ist zu erwarten, dass in den nächsten 10 Jahren sich die PKW-Dichte schrittweise an Westeuropa-

angleichen wird. Dies wird in diesen Ländern neben einer Verjüngung des Bestandes, einer Veränderung der Markenzusammensetzung auch zu einem deutlichen Wachstum des PGM-Recyclingpotenzialen (siehe nachfolgendes Kapitel), da immer mehr Fahrzeuge mit Katalysator ausgestattet sind und immer aufwändigere Abgasreinigungssysteme zum Einsatz kommen.

Die größten PGM Verluste drohen, wenn ein starkes Wachstum des Fahrzeugbestands vorliegt und es gleichzeitig an den wichtigsten Rahmenbedingungen für ein geordnetes Recycling der Altfahrzeuge fehlt. Insofern sind Russland und die Ukraine als Hot-Spots anzusehen, auf die sich die Anstrengungen zur Verbesserung eines internationalen Stoffstrommanagements konzentrieren sollten.

Erste Schlussfolgerung: Alle hier betrachteten Länder haben einen hohen Bedarf an Unterstützung aus Ländern, die bereits über einen entwickelten Rahmen zur Kontrolle der Recyclingpraxis verfügen, insbesondere was die Umsetzung der Altfahrzeug-Richtlinie betrifft. Gleichzeitig sind verbesserte Monitoringinstrumente zu entwickeln, um die mit den Abgaskatalysatoren verbundenen Stoffströme besser zu erfassen. Um die aufgezeigten Probleme zu lösen, kommen gezielten Transferleistungen in den Bereichen der Stoffstromanalyse, Stoffstromsteuerung sowie der Stärkung der administrativen und technologischen Kapazitäten eine wachsende Bedeutung zu.

3.5.4.1 Zusammenfassung der Ergebnisse der Länderstudien

Als ein Ergebnis der Länderstudien und internationaler Marktstudien kann festgehalten werden, dass die Fahrzeugbestände in den nächsten Jahren enorm ansteigen werden und gleichzeitig aufgrund der Verbesserung der Einkommensverhältnisse eine schnellere Modernisierung der Fahrzeugbestände stattfinden wird. Gleichzeitig wirkt Emissionsgesetzgebung in den neuen Beitrittsländern der EU und den ehemaligen GUS-Staaten als Treiber für eine stetig zunehmende Ausrüstung der Fahrzeugflotten mit Abgaskatalysatoren (vgl. Bloxham 2008). Vor diesem Hintergrund ist davon auszugehen, dass in den untersuchten Ländern spätestens ab 2020 mehr als 90 % der Fahrzeuge mit einem Katalysator ausgestattet sein werden. Der Aufbau effektiver Recyclingstrukturen und Regeln zur technischen Überwachung der Fahrzeuge erfolgt hierzu zeitverzögert. Entscheidend ist hierbei nicht der Zeitpunkt der Etablierung der ELV-Gesetzgebung, sondern deren Umsetzung in der Praxis (Vollzug). Einen Überblick über diese Randbedingungen enthält folgende Tabelle:

Tab. 19: Einflussfaktoren auf das PGM-Potenzial als Katalysatoren

	Fahrzeugbestand 2009 (Mio.)	Fahrzeugdichte pro 1000 Ein- wohner 2009	Euro-Norm 2007	Einführung Euro-Norm V	Vollzug ELV Gesetzgebung
Polen	16,5	433	Euro IV	2009	Bis 2010 ca. 50 %
Estland	0,5	407	Euro IV	2009	Geringe Vollzugsdefizite
Lettland	0,9	400	Euro IV	2009	Geringe Vollzugsdefizite
Litauen	1,7	506	Euro IV	2009	Geringe Vollzugsdefizite
Rumänien	4,5	197	Euro IV	2009	Geringe Vollzugsdefizite
Russland	30 (2008)	213 (2008)	Euro III	2014	Kein einheitlicher Gesetzlicher Rahmen
Ukraine	6,43 (2007)	140 (2007)	Euro III	2014	Ohne
Kasachstan	2,18 (2007)	170 (2007)	Euro II	-	Ohne

Quelle: Wuppertal Institute, data research

Durch diese Disparitäten erhöhen sich die Verlustrisiken für die Rückgewinnung von PGM-Potenzialen, wenn keine systematische Erfassung der Katalysatoren in den nächsten Jahren erfolgt und es auch keine gesetzlichen Vorgaben für die Demontage und Behandlung der Katalysatoren gibt. Der mögliche Zeitkorridor für die Einführung solche Maßnahmen wäre 8 bis 10 Jahre. Als Ursache für die Platinverluste sind daher nicht die Exporte aus Deutschland und anderen westeuropäischen Ländern anzusehen, sondern die unzureichende Wartung der Fahrzeuge sowie die Betriebs- und Recyclingstandards in den Zielländern.

Vor diesem Hintergrund können gehen von den veränderten Rahmenbedingungen einer gesellschaftlichen Modernisierung Effekte auf die technischen Systeme der Fahrzeugentwicklung aus, die dann wiederum den PGM-Bestand beeinflussen. Diese modellhaften Zusammenhänge sind in der nachfolgenden Tabelle dargestellt.

Tab. 20: Zusammenhänge zwischen der Entwicklung Fahrzeugflotten und dem PGM-Recycling

Veränderte Rahmenbedingungen	Wirkung auf den Fahrzeugbestand	Effekte auf die PGM-Potenziale
Allgemeine Wirtschafts- und Einkommensentwicklung	Wachstum der Fahrzeugflotte	Nach der Nutzungsphase erhöht sich der Bestand an Altfahrzeugen
Klimaschutz. Emissionsbezogene Gesetzgebung, Euro-Norm 5 für alle Fahrzeuge	Modernisierung der Fahrzeugflotten, Ausrüstung mit Katalysatoren	Erhöhung des Ausrüstungsgrades mit Katalysatoren und damit des PGM-Potenzials
Regelwerke zur technischen Überwachung	Verkürzung der Nutzungsdauer	Kürzere Verweildauer des PGMs im Fahrzeugbestand
Altfahrzeug-Gesetzgebung	Bessere Erfassung und Verwertung der Altfahrzeuge	Demontage der Katalysatoren

Quelle: eigene

Diese Entwicklungsprozesse verlaufen in den untersuchten Ländern unterschiedlich. Modernisierungsfortschritte im Fahrzeugrecycling sind in Polen und den baltischen Staaten erkennbar, sie haben aber immer noch einer zu geringe Dynamik. Es wurde zwar inzwischen ein gesetzlicher Rahmen geschaffen, um die EU-Altfahrzeug-Richtlinie umzusetzen, auf der praktischen Ebene gibt es jedoch vor allem in Polen zahlreiche Vollzugsdefizite, um den westeuropäischen Standard des Altfahrzeugrecyclings zu erreichen. So steht z.B. immer noch nicht fest, wer für den Aufbau der Infrastruktur im Sinne der Produktverantwortung verantwortlich ist. In Russland steht die Entwicklung eines gesetzlichen Rahmens am Anfang, eine Umsetzung in Verwaltungsvorschriften ist noch nicht erfolgt. Auch ergibt sich ein erhebliches Niveaufälle gegenüber den ländlichen Gebieten, sowohl was die Modernisierung des Fahrzeugparks als auch was den Aufbau effizienter Recyclingstrukturen betrifft. In allen untersuchten Ländern findet das Sammeln und Recyceln der Altfahrzeuge in sog. Grauen Märkten statt, insofern gibt es auch keine statistische Erfassung der Stoffströme.

Unabhängig vom Altfahrzeug-Recycling haben sich bereits einige Unternehmen darauf spezialisiert, aus Unfallfahrzeugen und Fahrzeugen aus dem oberen Segment Katalysatoren und andere wertvolle Aggregate auszubauen und einer Verwertung oder weiteren Verwendung zuzuführen. Hierbei wird deutlich, dass von der Marktnachfrage nach sekundären PGM erhebliche Impulse ausgehen und in diesen Ländern zu rein marktorientierten Verwertungsstrukturen führen, die sich außerhalb des Abfallregimes bewegen. Aus ressourcenpolitischer Sicht tragen diese Aktivitäten dazu bei, dass Verluste minimiert werden, ob hierbei internationale Umweltstandards verletzt werden kann aufgrund fehlender Informationen nicht beurteilt werden.

Eine organisatorischen und technische Modernisierung des Altfahrzeug-Recyclings kann die systematische Erfassung gebrauchter Katalysatoren wesentlich verbessern, es treten Lerneffekte bezogen auf das Stoffstrommanagement auf, die insgesamt dazu

beitragen, dass bei den beteiligten Akteuren das Umwelt- und Ressourcenbewusstsein erhöht wird (siehe die Entwicklung des Verbandes FORS in Polen).

3.5.4.2 Abschätzung der zukünftigen Wachstumspotenziale

Zur Abschätzung der Wachstumspotenziale sollen zunächst weitere osteuropäische Länder betrachtet werden (vgl. zu den nachfolgenden Angaben Wolk 2009). Ein wichtiger Wachstumsindikator ist die Pkw-Dichte pro Einwohner. In den "alten" EU Mitgliedsländern (Beitritt vor dem Jahr 2004) haben von 1.000 Einwohnern 504 einen Pkw. Auf 1.000 Einwohner der „neuen“ EU-Mitgliedsstaaten kommen derzeit jedoch nur 322 Pkw. Der Unterschied zu Russland (19,5% der gesamten europäischen Bevölkerung und 10,2 % des gesamten europäischen Pkw-Bestand) ist noch drastischer. Hier kommen auf 1.000 Einwohner nur 198 Pkw. Nachfolgende die Werte für weitere Osteuropäische Länder dargestellt.

Wachstum und Modernisierung des Pkw-Bestandes sind damit Bestandteile des langfristig zu erwarteten wirtschaftlichen Aufschwungs in diesen Ländern. Es ist zu erwarten, dass in den nächsten 10 Jahren sich die PKW-Dichte schrittweise an Westeuropäer angleichen wird. Dies wird in diesen Ländern neben einer Verjüngung des Bestandes, einer Veränderung der Markenzusammensetzung auch zu einem deutlichen Wachstum des PGM-Recyclingpotenzialen (siehe nachfolgendes Kapitel), da immer mehr Fahrzeuge mit Katalysator ausgestattet sind und immer aufwändigere Abgasreinigungssysteme zum Einsatz kommen.

Eine vergleichende Betrachtung ausgewählter Länder und der genannten Einflussfaktoren zeigt noch einmal die wesentlichen Unterschiede in der Entwicklung der Fahrzeugbestände und der Rahmenbedingungen auf.

Die größten PGM Verluste drohen, wenn ein starkes Wachstum des Fahrzeugbestands vorliegt und es gleichzeitig an den wichtigsten Rahmenbedingungen für ein geordnetes Recycling der Altfahrzeuge fehlt. Insofern sind Russland, Kasachstan und die Ukraine als Hot-Spots anzusehen, auf die sich die Anstrengungen zur Verbesserung eines internationalen Stoffstrommanagements konzentrieren sollten.

Erste Schlussfolgerung: Alle hier betrachteten Länder haben einen hohen Bedarf an Unterstützung aus Ländern, die bereits über einen entwickelten Rahmen zur Kontrolle der Recyclingpraxis verfügen, insbesondere was die Umsetzung der Altfahrzeug-Richtlinie betrifft. Gleichzeitig sind verbesserte Monitoringinstrumente zu entwickeln, um die mit den Abgaskatalysatoren verbundenen Stoffströme besser zu erfassen. Um die aufgezeigten Probleme zu lösen, kommen gezielten Transferleistungen in den Bereichen der Stoffstromanalyse, Stoffstromsteuerung sowie der Stärkung der administrativen und technologischen Kapazitäten eine wachsende Bedeutung zu.

3.5.4.3 Abschätzung des osteuropäischen PGM-Potenzials durch Johnson Matthey

Johnson Matthey hat eine erste Abschätzung des osteuropäischen PGM-Potenzials aus Autoabgaskatalysatoren vorgenommen. Bloxham hat diese Studie in Auszügen auf dem Workshop des Projektes in Berlin präsentiert (Bloxham 2009).

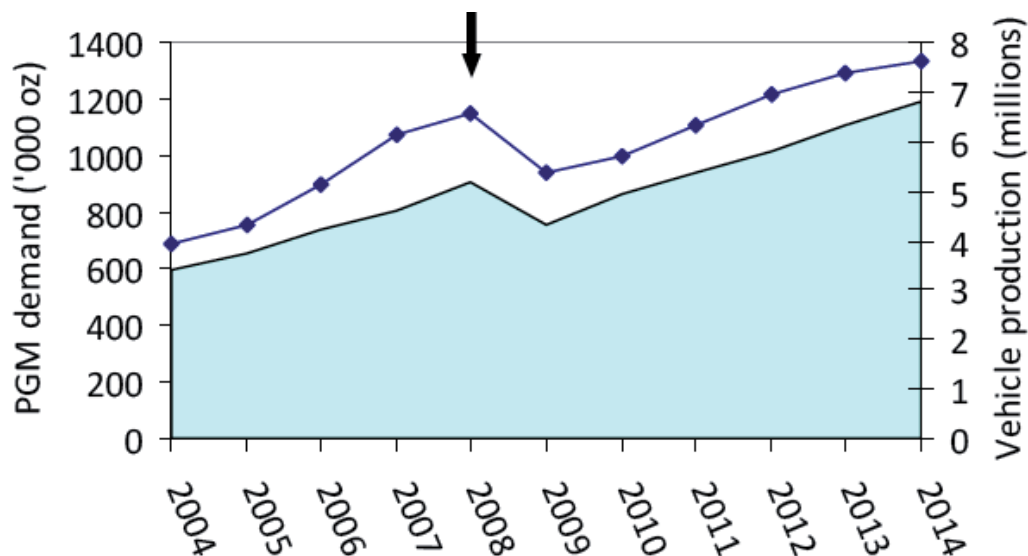
Die Analyse umfasst folgende Länder: alle mittel- und osteuropäischen Länder (MOEL) plus Russland, Usbekistan und Kasachstan. **Diese Länder verfügten 2009 über eine** Bevölkerung von 479 Mio. Einwohnern und über einen Fahrzeugbestand von knapp 94 Mio. Fahrzeugen. Dies entspricht einer Fahrzeugdichte von 196 Fahrzeugen pro 1.000 Personen.

Vor diesem Hintergrund erfolgte durch Bloxham (2009) eine Abschätzungen des PGM-Potenzials und ein Abgleich mit dem zukünftigen Bedarf aus der Automobil-Produktion. Ausgangspunkt waren die Recycling-Werte aus dem Jahr 2008 für Fahrzeugen, die erstmals in Osteuropa angemeldet wurden, Hieraus wurden ca. 2 t PGM zurückgewonnen. Aufgrund der steigenden Ausstattungsrate mit Katalysatoren und eines zu erwartenden Ausbaus der Recycling-Infrastrukturen wird ein Anstieg der Mengen auf 6,3 t in 2014 erwartet. Das würde einem Anstieg auf über 300 % entsprechen, trotzdem aber nur 16 % der erwarteten PGM-Nachfrage aus der Automobilproduktion dieser Länder abdecken.

Die Fahrzeugproduktion wird in Osteuropa für das Jahr 2009 auf 5,3 Mio. Stück, die Verkäufe auf 4,3 Mio. geschätzt, wobei in diesen Angaben noch keine Importe gebrauchter Fahrzeuge berücksichtigt sind.

Nach Bloxham (2009) wird sich die PGM-Nachfrage aus der Fahrzeugproduktion angesichts eines zu erwartenden stabilen Verhältnisses von Diesel- zu Benzinfahrzeugen synchron zur Fahrzeugproduktion entwickeln. Allerdings wird bei den Dieselfahrzeugen aufgrund technischer Entwicklungen das Verhältnis von Platin zum deutlich billigeren Palladium von 20:1 bis 2014 auf 3:1 sinken. Das bedeutet, dass sich die PGM-Nachfrage bis 2014 im Vergleich zu 2004 um 85% erhöhen wird (vgl. Abb. 27). In 2008 betrug sie insgesamt 28 t, wovon jeweils etwa 13 t auf Platin und Palladium entfielen.

Abb. 29: PGM-Nachfrage in Osteuropa bis 2014,



Legende: 2004 bis 2008 auf der Basis der Realentwicklung, ab 2009 Prognose. Die untere Linie bildet den PGM-Bedarf ab.

Quelle: Bloxham 2009

Ob von dieser gesteigerte Nachfrage nach PGM in den neuen Produktionsstandorten auch Impulse ausgehen für den Aufbau von Redistributionsstrukturen und ein verbessertes Stoffstrommanagement ist eher unwahrscheinlich, da in den Automobilkonzernen die PGM-Beschaffung zentral und im Rahmen des internationalen Handels erfolgt. Die Abschätzungen von Bloxham (2009) liefern hierbei wichtige Erkenntnisse über den zukünftigen Bedarf in den mittel- und osteuropäischen Staaten. Es ist zu erkennen, dass sich in Europa die geografischen Schwerpunkte für das PGM-Recycling von Autokatalysatoren verschieben. Die Faktoren hierfür sind das Wachstum der Fahrzeugbestände in Mittel- und Osteuropa und den CIS-Staaten sowie die Erhöhung der PGM-Beladungen in den Fahrzeugen aufgrund der Verbesserung der Emissionsstandards. d.h. der Anteil der Fahrzeuge, die mit einem geregelten 3-Wege-Katalysator ausgestattet sind, wächst. Auch Fahrzeugwartung und Fahrzeugpflege gleichen sich internationalen Standards allmählich an.

3.6 Maßnahmenvorschläge für den Bereich der Autoabgaskatalysatoren

Die nachfolgend vorgeschlagenen Maßnahmen entsprechen dem Maßnahmenkatalog, wie er bereits im Rahmen der Roadmap entwickelt wurde, die auf dem Workshop in Berlin zur Diskussion gestellt wurde. Hierbei geht es darum, die verschiedenen Akteure in der Recyclingkette „Abgaskatalysatoren“ in einen Diskurs über gemeinsame Ziel-

setzungen zur Verbesserung des internationalen Stoffstrommanagements einzubinden. Insbesondere die Vorschläge zur Umsetzung wurden nach den geführten Expertengesprächen noch einmal überarbeitet und angepasst.

3.6.1 Maßnahmenfeld „Festlegung von Qualitätsstandards für Katalysator-Logistik und Katalysator-Entmantelung“

3.6.1.1 Problemstellung

Die Altfahrzeugverwertung, der Handel mit demontierten Katalysatoren aus Altfahrzeugen und die Katalysator-Entmantelung erfolgen sowohl in Europa (EU27) als auch in Russland und den angrenzenden Staaten in Mittelasien mit uneinheitlichen Standards hinsichtlich Logistik, Aufbereitung und Preisermittlung. In den nationalen Gesetzen zur Altfahrzeugentsorgung wird nur festgelegt, dass der Kat zu demontieren ist, das Abfallrecht legt nur allgemein fest, wie die Umwelt vor gefährlichen Stoffen zu schützen ist. Es gibt daher einen Handlungsbedarf, Qualitätsstandards für die Lagerung, den Transport und die Entmantelung von Katalysatoren festzulegen und durch die Beteiligten in der Wertschöpfungskette „Kat-Entsorgung“ einen Konsens über eine gute Praxis herzustellen.

Die Möglichkeiten, mittels des **nationalen** abfallrechtlichen Instrumentariums hierauf Einfluss zu nehmen, sind begrenzt, da es sich hierbei um einen weitgehend **internationalisierten** Sekundärrohstoffmarkt handelt. Wie in jedem Markt wird dieses Geschehen durch Angebot und Nachfrage beeinflusst sowie durch die Preisentwicklungen an den internationalen Metallbörsen.

3.6.1.2 Maßnahmenvorschläge

Decanner und Refiner in Westeuropa, die an einer hochwertigen Rückgewinnung der PGMs aus Autokatalysatoren Interesse haben, sollten versuchen, dass ihre „Gute Praxis“ auch in Osteuropa Eingang findet. Sie sollten gemeinsam einen Standard definieren, der beschreibt, wie die Einsammlung, die Entmantelung und die Rückgewinnung der PGMs erfolgen sollte. Diesem Standard können dann die am Markt tätigen Unternehmen, die in Osteuropa (und in den ehemaligen GUS-Staaten) Katalysatoren einsammeln und bearbeiten, beitreten. Eine solche Good-Practice-Initiative könnte durch ein eigenes Label gestützt werden.

Im Einzelnen sollten folgende Maßnahmen ergriffen werden:

- Erstellung eines „Good Practice Guide“ für das PGM-Recycling aus Autokatalysatoren (diesen zu entwickeln könnte die Aufgabe eines europäischen PGM-Expertenetzwerkes werden) Hierbei müssten alle Stufen der Katverwertung betrachtet werden.

- Commitment der beteiligten Wirtschaftakteure, sich an diesem Guide zu orientieren und an dem Netzwerk zu beteiligen
- Einschaltung eines neutralen Gutachters (TÜV, DEKRA), der den Standard zertifiziert
- Aufnahme der Standards in die Vertragsgestaltung zwischen den Refinern und den vorgelagerten Dienstleistern

Sowohl auf dem durchgeführten Workshop als auch in den anschließenden Expertengesprächen fand dieser Vorschlag starke Zustimmung. Es wurde vorgeschlagen, die Diskussion über die Verbesserung der Qualitätsstandards in die internationalen Verbandsgremien der Refiner einzubringen. Die Erstellung eines „Good Practice Guide“ steht vor der Aufgabe, insbesondere im Bereich der Erfassung des Materials und des Decanning auch die entsprechenden Umweltgesetze zu berücksichtigen, deren Vollzug im internationalen Maßstab allerdings auf unterschiedlichem Niveau erfolgt. Bedeutsam sind hierbei die Vorgaben aus den Altfahrzeuggesetzen sowie die Begrenzung von Staubemissionen beim Decanning, die gleichzeitig eine Quelle für Materialverluste sein können.

3.6.1.3 Umsetzung

Einbezogen werden sollten alle Akteure der PGM-Verwertungskette (Sammler, Dismantler, Decanner, Refiner). Es empfiehlt sich ein getrenntes Vorgehen in der europäischen PGM-Recyclingkette und weiterer Zielländer aufgrund der sehr unterschiedlichen Rahmenbedingungen. Die Autoindustrie könnte einen nennenswerten Beitrag zum Know-how Transfer leisten, indem sie die Erfahrungen mit ihrer eigenen, werkstattbezogene Redistributionslogistik vermittelt. Als realistisches Zeitfenster für die Umsetzung erster Schritte sind 2 Jahre anzusehen.

3.6.2 Maßnahmenfeld „Aufbau eines internationalen Redistributionssystems“

3.6.2.1 Problemstellung

Abfallwirtschaftliche Produktverantwortung oder im internationalen Kontext „extended producer responsibility“ (EPR) bezeichnet einen Politikansatz, die finanzielle und oder physische Verantwortung des Herstellers (oder Importeurs) für sein Produkt auch auf die Nachnutzungs- bzw. Entsorgungs-Phase auszudehnen. Ziel der EPR ist es, die Externalisierung von am Ende des Lebenszyklus für die Entsorgung (Verwertung und Beseitigung) anfallenden Kosten durch die Hersteller zu verhindern und damit zum einen direkte Anreize zu setzen, das Abfallaufkommen zu verringern und indirekt Innovationen für ein Produktdesign zu fördern, das die Lebenszykluskosten der Produkte minimiert. Die EPR ist in der Altfahrzeug-Richtlinie (bzw. in Deutschland in der Altfahr-

zeugverordnung) verankert und manifestiert sich dort in der Verantwortung der Hersteller, die Altfahrzeuge kostenlos vom Letzthalter zurückzunehmen.

Durch den internationalen Handel mit Gebrauchtfahrzeugen (vgl. Buchert et al 2007) entsteht die Notwendigkeit, dass die Hersteller der Fahrzeuge diese Verantwortung auch auf internationaler Ebene – also auch außerhalb der EU – wahrnehmen. Dies kann durch freiwillige Maßnahmen geschehen, zumal sich durch die verbesserte Rückführung der Sekundärrohstoffe auch neue Chancen für eine gesicherte Rohstoffbeschaffung der PGM eröffnen.

3.6.2.2 Maßnahmen

Für eine Wahrnehmung ihrer internationalen Produktverantwortung wird daher vorgeschlagen, dass sich die Automobilhersteller gemeinsam mit den Herstellern von Autokatalysatoren verpflichten, einen bestimmten Anteil der von ihnen in Umlauf gebrachten Katalysatoren einem Recycling-Prozess wiederzuzuführen. Hierzu wird eine gemeinsame Zielvereinbarung angestrebt, welches das Eigeninteresse der beteiligten Akteure (Sicherung der PGM-Versorgung, Absatzpotenziale für glaubwürdig „grüne“ Fahrzeuge) an einem effizienten institutionellen Design berücksichtigt. Diese proaktive Maßnahme ist ein Signal an alle Beteiligten in der PGM-Recyclingkette. Sie wartet nicht langwierige Änderung der rechtlichen Rahmenbedingungen (zudem im internationalen Kontext) ab. Ziel eines gemeinsamen Diskussionsprozesses mit den staatlichen Stellen und weiteren Stakeholdern sollte daher die Entwicklung von Zielvorgaben sein, bevor Maßnahmen und Instrumente diskutiert werden.

Technische Umsetzung mittels RFID:

Das verbesserte Stoffstrommanagement der Hersteller könnte durch eine Kennzeichnung mit einem Radio Frequency Identification Device (RFID)-System unterstützt werden.³⁰ Anhand dieser Kennzeichnung kann ohne großen Aufwand festgestellt werden, welcher Hersteller seiner Produktverantwortung tatsächlich nachkommt und für einen entsprechenden Rücklauf Sorge getragen hat. RFIDs werden in unterschiedlichen Kontexten als Instrument zur Schließung von Recyclingkreisläufen diskutiert (vgl. Binder et al. 2008), würden sich aus unterschiedlichen Gründen aber besonders für Autokatalysatoren eignen:

- Der Katalysator verfügt durch das in ihm enthaltene PGM über einen entsprechenden Wert, der das Aufbringen eines RFID-Tags lohnt. Die Kosten belaufen sich aktuell etwa auf 0,05 Euro, könnten bei Massenproduktion aber auch noch unter die 1-Cent-Marke sinken. Deutlich teurer sind allerdings die Kosten für die technische

³⁰ Inzwischen werden am Markt RFID-Datenträger mit einer Temperaturbeständigkeit von 300 °C angeboten, siehe: <http://www.pressebox.de/pressemitteilungen/smart-tec-gmbh-co-kg/boxid/272189>

Infrastruktur zum Auslesen der Tags. Entsprechende Berechnungen für andere Abfallfraktionen wie den Elektroschrott lassen aber vermuten, dass hier besonders in den Hauptzielländern europäischer Gebrauchtwagenexporte relativ kurze Amortisationszeiten erreicht werden könnten.

- Durch die relativ niedrige Anzahl von spezialisierten Betrieben für die Entmantelung von Katalysatoren würden die Gesamt-Kosten im Vergleich zu anderen Abfallfraktionen mit einer Vielzahl von Annahme- und Verarbeitungsstellen deutlich niedriger ausfallen.
- Der RFID-Tag würde nicht nur eine herstellersistematische Zuordnung des Katalysators auch nach dem Ausbau ermöglichen. Durch zusätzliche Informationen (Alter, PGM-Gehalt) leistet er auch einen Beitrag zur Senkung von bei Katalysatoren ausgeprägten Informations-Asymmetrien über die Qualität des potentiellen Sekundärrohstoffes, die häufig zu Prozessen adverser Selektion und im Endeffekt zu einem Marktversagen in Form zu niedriger Recyclingquoten führen (OECD 2006).

Sobald ein solches informationsgestütztes Redistributionssystem installiert ist, könnten zusätzliche Formen der „Materialverantwortung“ (Minsch et al. 1996) die ökonomischen Anreize zur Kreislaufführung von PGM steigern. Der Katalysator und die darin enthaltenen Rohstoffe würden zukünftig in einem Leasingmodell im Besitz des Fahrzeugherstellers verbleiben und damit über ein Pfandsystem den Rücklauf des PGM optimieren. Der Kunde würde beim Fahrzeug nicht den Kat an sich, sondern nur ein Nutzungsrecht erwerben.

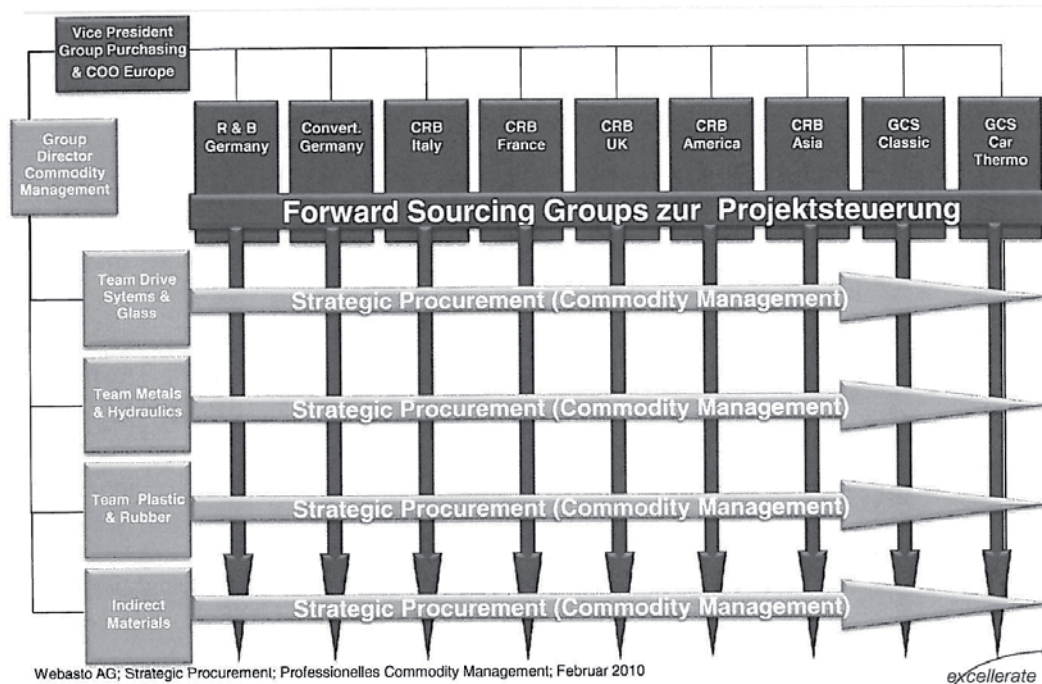
Für eine derartige Trennung von Nutzungs- und Rohstoffperspektive von Produkten bestehen aber noch eine Vielzahl offener Fragen (z.B. Ausgestaltung der Pfandhöhe bei stark schwankenden Preisen; Auswirkung auf das Nutzungsverhalten der Fahrzeugbesitzer, rechtliche Regulierung bei Schäden, rechtliche Durchsetzbarkeit des Eigentums im internationalen Handel). Für die Klärung dieser Fragen besteht zusätzlicher Forschungsbedarf.

Die Fahrzeughersteller könnten ihre bestehenden Redistributionssysteme im Bereich des Austauschs defekter Katalysatoren erweitern bzw. auf die hiermit gesammelten Erfahrungen zurückgreifen. Sie könnten anbieten, die in ihren Fahrzeugen eingesetzten Kats auch aus der Altfahrzeugverwertung zurückzunehmen und die bestehenden Redistributionswege zu nutzen. Das Interesse der Automobilindustrie könnte gestärkt werden, wenn der Refiner bereit ist, dieses gelieferte Altmaterial mit einem Bonus bei der Lieferung von neuen Kats zu honorieren.

Der Umfang eines kompletten Kat-Recyclings aus einem nationalen Fahrzeugbestand eines Herstellers macht es des Weiteren notwendig, hierzu ein professionelles commodity management einzurichten. Eine solche Funktion sollte unternehmensintern nicht bei der Umweltautorität angesiedelt werden, sondern bei der Beschaffung, da das Kat-Recycling in Zukunft aus Sicht der Automobilindustrie zu einer wichtigen Rohstoffquelle wird. Wie ein solches „Forward Sourcing“ organisiert werden kann, zeigte

der Beitrag von Lütkes (2010) auf der „Commodity Masters“ am 9. und 10. Februar 2010 in Berlin, siehe Abb. 30. Zentral ist hierbei die Verbindung des Beschaffungswesens mit den Rücknahmesysteme in einzelnen Ländern.

Abb. 30: Purchasing Organisation Webasto AG



Quelle: Lütkes 2010

3.6.2.3 Umsetzung

Die konkrete Vorgehensweise kann in mehrere Schritte unterteilt werden:

- Schritt 1: Alle neu produzierten Kats sollen über einen entsprechenden RFID-Tag verfügen.
- Schritt 2: Modellversuche für ein Pfandsystem für Autokatalysatoren, evtl. in Kooperation mit den Werkstatt-Rücknahmesystemen.
- Schritt 3: Erste verpflichtende Rücklaufquote, die anschließend dynamisch erhöht werden kann.

Die Hersteller von Automobilen und Autokatalysatoren sollten sich verpflichten, eine bestimmte Quote an in Umlauf gebrachten Kats dem Produktionssystem wieder zuzuführen. Als zusätzlichen Anreiz für den Autobesitzer wäre ein Pfandsystem zu erproben, welches sich auf die RFID-Informationen stützt. Über das RFID ist immer die Zu-

ordnung zu einem konkreten Fahrzeug möglich und somit eine illegale Demontage des Kats erschwert.

Für den Entmantler besteht auf der technischen Umsetzungsebene die Aufgabe, technische Geräte zu installieren, die die RFID-Tags identifizieren können und diese Informationen an den Hersteller zu übermitteln. Die aufbereiteten Katalysatoren werden anschließend wie bisher an die Refiner weitergeleitet, die auf den RFID-Tags enthaltenen Informationen über ein gemeinsames Datensystem zur Berechnung der Herstellerquoten verwendet. Durch spezielle Vertragsgestaltungen zwischen der Automobilindustrie und den Refinern können dann in einem weiteren Schritt spezifische Beschaffungskonditionen festgelegt werden (z.B. wenn der Refiner über eine vom Automobilhersteller gestützte Redistributionskette regelmäßig und gesichert Sekundärmaterial erhält).

3.6.3 Maßnahmenfeld „Gebrauchtwagenexporte/-importe“

3.6.3.1 Problemstellung

In einem Forschungsprojekt des UBA (Buchert et al 2007) wird vor allem die hohe Exportfahrzeugquote für gebrauchte Pkws für die geringe nationale Recyclingquote im Bereich der Autoabgaskatalysatoren verantwortlich gemacht. Diese Sichtweise nimmt als Systemgrenze die deutsche Volkswirtschaft an und behandelt die Zielländer als „Black Box“.

Im Rahmen der länderbezogenen Fallstudien (Kap. 3) konnte ermittelt werden, dass als Ursache für die Platinverluste nicht die Exporte als solche anzusehen sind, sondern die darin anschließende Nutzungsdauer und Nutzungsbedingungen in den Zielländern (z.B. fehlende Kontrolle der Betriebsaggregate auf ihre Funktionstüchtigkeit und damit Gefahr unkontrollierter PGM-Emissionen) und das Fehlen funktionierender Recyclingstrukturen. Hinsichtlich der Handlungsorientierung in diesem Maßnahmenfeld müssen daher die Maßnahmen zwischen exportierendem Land und dem Zielland des Exports in Zukunft enger abgestimmt werden.

3.6.3.2 Maßnahmen auf EU-Ebene

Novellierung der Altfahrzeug-Gesetzgebung: Klare Abgrenzung von Altfahrzeug und (legal im freien Warenverkehr) exportierbarem Gebrauchtwagen und Vollzug dieser Regelungen. Für die Abgrenzung von Gebrauchtwagen und Altfahrzeug gibt es seit Jahren nur eine juristische Definition, die aber nicht vollzugstauglich ist. Hieraus resultiert das Problem, dass unter Umgehung des Abfallrechts Fahrzeuge exportiert werden, die eigentlich nicht mehr verkehrstauglich und fahrbereit sind. Vor diesem Hintergrund müssen die Begriffe Verkehrstauglichkeit und fahrbereit so operationalisiert

werden, dass sie für die kontrollierende Zollbehörden mit vertretbarem Aufwand überprüft werden können.³¹

In das durch die EU-Kommission praktizierte länderbezogene Monitoring der Altfahrzeug-Gesetzgebung und deren Umsetzung in den Mitgliedsstaaten werden Fragen zur Katalysator-Demontage aufgenommen. Insbesondere sollte unter Beachtung des Datenschutzes die Anzahl der separierten Katalysatoren ermittelt werden und der weitere Entsorgungsweg.

Maßnahmen

Um hier verdeckte Altfahrzeugexporte auszuschließen bedarf es klarer gesetzlicher Definitionen hinsichtlich der Fahrtauglichkeit und zusätzlicher Kontrollen durch Behörden oder autorisierte Sachverständige.

Die Erfassung der Gebrauchtwagenexporte sollte mit einem Monitoring (Erfassung der Fahrzeuge nach Fahrzeugklassen, Alter und Gewicht) verbunden werden, um Schritt für Schritt bestehende Erfassungslücken zu schließen.

3.6.3.3 Maßnahmen des exportierenden Landes

Fahrzeuge mit defekten Motoren, Aggregaten, Leckagen und anderen umweltrelevanten Defiziten sollten nicht exportiert werden können, da dies auf eine Verlagerung von Umweltbelastungen in Drittländer hinausläuft. Daher sollte auf EU-Ebene ein Export-„TÜV“ für Gebrauchtwagen eingeführt werden, der bestätigt, dass das exportierte Fahrzeug keine oder nur kleine reparierbare Mängel aufweist. Dies entspricht dem derzeitiger Ansatz des Entwurfs der EU-Anlaufstellenleitlinien, welche fordert, dass das Auto funktionsfähig sein muss und es nur „kleinerer Reparaturen“ bedarf, um dies zu gewährleisten. Bei offensichtlichen Mängeln kann Kfz-Gutachter eingeschaltet werden.

Ein Projekt des IMPEL-Netzwerks³² hat für den Altfahrzeug-Export Kriterien³³ entwickelt und diese mit Praktikern der Zollbehörden in Belgien und Schweden erprobt. Der Report dokumentiert die Anwendung der Kriterien sehr praxisnah (vgl. IMPEL-TFS 2008, 14 ff.). Insbesondere wird durch den Bericht deutlich, dass nicht nur komplette Fahrzeuge exportiert werden, sondern auch Ersatzteile, vorbehandelte Autowracks und Schredder-Abfall. Über die Exporttätigkeiten in diesen Bereichen liegen bisher

³¹ Zurzeit wird eine Guideline auf EU-Ebene als Anlaufstellenleitlinie wie für WEEE erarbeitet und abgestimmt. Für D arbeitet das BMU dort mit.

³² Impel Network = Network for the Implementation and Enforcement of Environmental Law is an informal network of the environmental authorities of EU Member States, acceding and candidate countries, and Norway. The European Commission is also a member of IMPEL and shares the chairmanship of its Plenary Meetings. (Website: Impel)

³³ Diese Kriterien sind nicht geeignet die weitere Verwendung PGM-haltigen Materials aufzuklären

keine systematisch erhobenen Daten vor. Es bleibt aber offen, ob die Zollbehörden aufgrund ihrer Personalausstattung diese Aufgaben flächendeckend übernehmen können und welche Sanktionsmöglichkeiten/Strafen es geben sollten, falls die Kriterien nicht erfüllt werden.

Entsprechend sollten die Zollbehörden von allen Exporteuren in Zweifelsfällen eine entsprechende Bescheinigung einholen können. Auf dieser Basis sind die Zollbehörden in der Lage, den verdeckten Export von Fahrzeugen, die eigentlich ins Abfallregime gehören, zu unterbinden.

Als Vollzugshilfe an den Exportstellen sind Leitlinien zur Abgrenzung von Gebrauchtwagen und Altfahrzeug analog zu den Anlaufstellen-Leitlinien für Elektroaltgeräte³⁴ zu formulieren. Die EU-Kommission diskutiert derzeit einen Entwurf für solche Leitlinien mit den Mitgliedstaaten.

Ein zweiter Ansatzpunkt sind die Verfügungsrechte des letzten Fahrzeughalters. Diesem sollte mit einer zusätzlichen Rubrik im Abmeldeformular die Möglichkeit eingeräumt werden, die Verschrottung seines Fahrzeuges zu bestimmen (und damit die Möglichkeit unterbinden, dass nach Abmeldung des Fahrzeuges und Übergabe an eine Annahmestelle mit diesem Fahrzeug als ganzes weiter gehandelt wird. Entsprechend einer solchen Praxis sollte die Kfz-Bundesamt in Flensburg eine statistische Kategorie einführen: „Zur Verschrottung durch den Letzthalter bestimmt“.

Entsprechend der Praxis bei der Abwrackprämie sollte für diese Fahrzeuge eine Verpflichtung bestehen, den Fahrzeugbrief unbrauchbar zu machen und damit den weiteren Handel mit dem Altfahrzeug zu unterbinden³⁵.

3.6.3.4 Maßnahmen des Empfängerlandes

Als erste Maßnahme ist zu empfehlen in den Zielländern eine regelmäßige technische Betriebstauglichkeit aller Fahrzeuge vorzunehmen und insbesondere eine Abgasprüfung durchzuführen. Hierdurch können Fahrzeuge mit beschädigten und defekten Katalysator identifiziert werden, der dann umgehend zu ersetzen ist.

Als zweite wichtige Maßnahme empfehlen wir, die EU-Altfahrzeug-Richtlinie zügig in den neuen Beitrittsländern auch auf den nachgelagerten Ebenen umzusetzen und so

³⁴ deutsch: http://www.umweltdaten.de/abfallwirtschaft/gav/Anlaufstellen_Leitlinien_Nr_1.pdf
englisch: http://www.umweltdaten.de/abfallwirtschaft/gav/Correspondents_guidelines_No_1.pdf
(REVISED CORRESPONDENTS' GUIDELINES No 1, Subject: Shipments of Waste Electrical and Electronic Equipment (WEEE))

³⁵ Der Export von Altfahrzeugen ist bereits untersagt, allerdings sind Altfahrzeuge nicht eindeutig von alten Gebrauchtfahrzeugen abgegrenzt. Eine Kontrolle durch die Zollbehörden erfolgt nur punktuell.

zu gewährleisten, dass alle Katalysatoren vor dem Schreddern demontiert werden. Darüber hinaus ist es sinnvoll, die weiteren Bearbeitungsschritte auf einem hohen Qualitätsniveau zu gewährleisten (siehe hierzu Maßnahmenfeld A). Zu diesen Fragen sollte auch ein Erfahrungsaustausch mit den Umweltverwaltungen in Westeuropa organisiert werden.

Gesonderte Importzölle oder Altersbegrenzungen für importierte Gebrauchtwagen, wie in der Vergangenheit von einzelnen Staaten erhoben, sind mit dem Handelsrecht nicht vereinbar. Auch besondere emissionsbezogene Regelungen, die vom Standard für die Fahrzeugflotte im Inland abweichen, geraten in Konflikt mit dem Handelsrecht. Jedem Zielland steht allerdings frei, die Besteuerung der Fahrzeuge entsprechend ihres CO₂ Ausstoßes zu regeln oder Dieselfahrzeuge ohne Rußfilter in den Umweltzonen der Städte zu diskriminieren. Derartige Maßnahmen beeinflussen auch indirekt den Markt für Importfahrzeuge.

3.6.3.5 Umsetzung

Auf der europäischen Ebene sollte durch politischen Beschluss des Europäischen Arbeitskreises eingerichtet werden, der die gemachten Vorschläge diskutiert und juristisch überprüft. Diesem Arbeitskreis sollten folgende Akteure angehören: EU- Umwelt Kommission, Verantwortliche für die Überwachung der Umsetzung der Altfahrzeug-Richtlinie in der EU 27, Gesetzgeber und Wirtschaftsakteure (Recyclingindustrie und Katalysator-Handel) in den Zielländern, Zollbehörden und andere Vollzugsorgane in den Exportnationen, aber auch Wirtschaftsakteure, die zwischen Export- und Importland operieren, wie Händler, Reeder, Spediteure etc.

Der Arbeitskreis sollte sofort seine Arbeit aufnehmen und Ende 2012 erste Ergebnisse vorlegen.

3.6.4 Maßnahmenfeld „Technologie- und Wissenstransfer für die neuen EU-Beitrittsländer und ausgewählte CEC-Staaten“

3.6.4.1 Problemstellung

In den meisten westeuropäischen Ländern auf Basis der Altfahrzeugverordnung ein System entstanden, welches zu einer systematischen Erfassung und Verwertung von Altfahrzeugen führt. Dieses sieht vor, dass die Katalysatoren vor dem Schredder demontiert werden und einer gesonderten Verwertung zugeführt werden. Auch wenn in der folgenden Kette Intransparenzen existieren, so liegen hinsichtlich der Redistribution, Entmantelung und Rückgewinnung des PGMs genügend Erkenntnisse vor, wie ein effektives Stoffstrommanagement von PGM aus Autokatalysatoren gestaltet werden kann.

Um das organisatorische und technische Niveau in den Zielländern von Gebrauchtwagen an die deutsche und westeuropäische Recyclingpraxis anzugleichen, sollte das

Recycling von PGM aus Autokatalysatoren zu Gegenstand von bilateralen und multilateralen Transfermaßnahmen werden.

3.6.4.2 Maßnahmen

Aus der Perspektive der Rückgewinnung von Stoffen und der Ressourcenschonung sollten sich die Transfer-Maßnahmen auf folgende Zielfelder beziehen:

- Aufbau von effektiven Recyclingstrukturen für Altfahrzeuge (sowohl innerhalb der EU 27, als auch schwerpunktmäßig in den weiteren Zielländern Eurasiens)
- Verschärfung und Erweiterung der Umweltvorschriften hinsichtlich diffuser Materialeinträge durch den Kfz-Betrieb
- Aufbau einer effektiven Kontrolle zur Überprüfung der Betriebsstandards der Fahrzeuge (entsprechend dem TÜV, Dekra in Deutschland)

Langfristig ist grundsätzlich anzustreben, dass in den Zielländern der Gebrauchtwagenexporte zumindest in den Stufen Redistributionslogistik und Entmantelung transparente und effektive Recyclingstrukturen aufgebaut werden. Nach der Entnahme der wash-coats ist eine Mengenbündelung ökonomisch sinnvoll. Die PGM-haltigen Coats sollten dann leistungsfähigen und ressourceneffizienten Anlagen zugeführt werden, die eine höchstmögliche Rückgewinnung des Materials gewährleisten.³⁶

Eine Transferpolitik, welche darauf zielt, technische und organisatorische Niveaus zwischen verschiedenen Ländern auszugleichen, kann in erheblichen Maße dazu beitragen, das globale PGM-Recycling zu verbessern. Hierbei sollte auf bereits etablierte Transferinstrumente und Förderstrukturen zurückgegriffen werden. Eine Übersicht über die möglichen Inhalte und Ansatzpunkte einer Transferpolitik liefert die nachfolgende Tabelle.

³⁶ „At present in Poland there is no plant where PGM can be recovered. The used auto catalytic converters are purchased, collected and then imported to other countries especially Germany“ (A. FORMALCZYK, M. SATERNUS (2009))

Tab. 21: Aufgaben und Instrumente einer Transferpolitik zu Verbesserung der PGM-Rückgewinnung aus Autokatalysatoren

Förderziele	Programme	Instrumente
Verbesserung der Wissensbasis	Diverse Programme der EU zur Forschungskooperation im Bereich Waste Management, Förderung von Anbahnungsmaßnahmen für die internationale Zusammenarbeit im wissenschaftlichen Bereich (Internationales Büro des BMBF)	Forschungskooperation/ Forschungsstipendien, Guidelines für Praktiker (in den Sprachen der Zielländer), Internetportal für Best Practice in der Autoverwertung (z.B. wie http://www.cleaner-production.de/), Fachkongresse
Aufbau effektiver administrativer Strukturen für den Vollzug von Gesetzen	EU-Twinning-Programm ³⁷ Ziel eines Twinning-Projektes ist es, neue EU-Mitgliedstaaten und EU-Kandidatenländer bei der Übernahme des gemeinschaftlichen EG-Rechts (acquis communautaire) und dem Aufbau der dazu notwendigen Verwaltungskapazitäten (institution building) zu unterstützen. Im Rahmen der EU-Nachbarschaftspolitik (ENP) ist das Programm auch für Staaten zugänglich, die keine Beitrittskandidaten sind (Ukraine, Moldau, Südkaukasus, Zentralasien, Mittelmeeranrainerstaaten).	Experten aus Verwaltung der EU-Mitgliedstaaten geben ihr Wissen und ihre Erfahrungen in der Umsetzung des EG-Rechts an Kollegen im jeweiligen Partnerland weiter. "Rückgrat" des Projekts ist ein Langzeitberater (Resident Twinning Advisor = RTA), der mit Unterstützung von Kurzzeitexperten für die gesamte Projektdauer, meist 1-2 Jahre, in der Partnerbehörde
Einsatz der besten verfügbaren Technik	Exportinitiative Recycling und Effizienztechnik (RETech) des Bundesumweltministeriums, Verstärkung der technischen Entwicklungszusammenarbeit über Förderung der GT	Investitionen in Pilotanlagen
Netzwerkbildung, Unternehmenskooperationen	Brücke-Osteuropa e.V. - Arbeitsgemeinschaft für Wirtschafts- & Technologie-Kooperation mit Osteuropa Eastbridge, www.bruecke-osteuropa.de	Zusammenarbeit zwischen Fahrzeugindustrie und Kat-Herstellern Zusammenarbeit zwischen allen Akteuren in der PGM-Recycling-Kette Bilaterale Technologiepartnerschaften, Pilotprojekte anstoßen, Gemeinsamer Messestand der PGM-Industrien auf der IFAT in München

³⁷ Twinning-Projekte werden von den potentiellen Partnerländern in Abstimmung mit der EU-Kommission ausgeschrieben, die Behörden der EU-Mitgliedstaaten bewerben sich darauf im Wettbewerb. Das Bundesumweltministerium hat sich seit Beginn des Programms 1998 an insgesamt 74 Twinning-Projekten mit einem Gesamtbudget von mehr als 70 Mio. Euro beteiligt, davon an 64 Projekten als Projektleiter.

Quelle: eigene Zusammenstellung

Bedeutsam sind auch die Netzwerke im europäischen Forschungsraum wie das Förderprogramm EUREKA³⁸.

3.6.4.3 Umsetzung

Für die Umsetzung ergeben sich je nach Aufgabenzuschnitt des Transferziels unterschiedliche Akteurskonstellationen. Hinsichtlich der Struktur möglicher Transfers können sowohl unilaterale und multilaterale Strategien verfolgt werden. Es empfiehlt sich zunächst, Netzwerke unterschiedlichen Typs zu etablieren, zum Beispiel eine verstärkte Kooperation der Umwelt- und Vollzugsbehörden oder Kooperationen von Unternehmen in der Wertschöpfungskette.

Die von uns durchgeführte vertiefende Untersuchung zu den Akteurskonstellationen im Fahrzeugrecycling in Russland, Polen und den baltischen Staaten haben zu zahlreichen Kontakten geführt (siehe Liste im Anhang) die vor allem im Fahrzeugrecycling und der PGM-Rückgewinnung tätig sind. Das Ziel dieser Gespräche und Interviews war nicht nur die Situation des Recyclings in jeweiligen Ländern kennen zu lernen. Es ging ebenso darum, Meinungen über die Maßnahmen einzuholen, die in der von uns erarbeiteten Roadmap beschrieben wurden. Außerdem sollten Möglichkeiten für eine weitere Zusammenarbeit gestärkt werden. Zu diesem Zweck wurde die Roadmap in die russische und polnische Sprache übersetzt.

Viele Akteure betrachten die Roadmap als sinnvolles Instrument, um Maßnahmen-schwerpunkte festzulegen. Allerdings führen die unterschiedlichen nationalen Rahmenbedingungen dazu, dass auch ein hohes Interesse besteht, über die jeweiligen Defizite zu sprechen und in einen Erfahrungsaustausch über national-spezifische Lösungen einzutreten. In diesem Zusammenhang ist für Akteure aus dem Bereich Fahrzeugrecycling die Separierung von Kats und die PGM-Rückgewinnung eher ein sekundäres Problem. Als wichtige Themenfelder wurden Regelungen zur Ausgestaltung der Produktverantwortung der Fahrzeughersteller und eine bessere Abstimmung mit den Zollbehörden hinsichtlich der Fahrzeugimporte benannt. Angeregt wurde ein deutsches Exportverbot für nicht mehr fahrbereite Fahrzeuge.

Alle Interviewpartner haben ein starkes Interesse an einer weiteren Kooperation mit dem Umweltbundesamt und dem Wuppertal Institut bekundet. Hinsichtlich der Situation in Deutschland waren diese Akteure insbesondere daran interessiert, den Vollzug des Altfahrzeuggesetzes kennen zu lernen und einen Überblick über wichtige Instrumente des Stoffstrommanagements zu bekommen.

³⁸ <http://www.kooperation-international.de/russland/themes/info/detail/data/2957/>

Die Form dieser Zusammenarbeit könnte über geförderte Transferprojekte abgewickelt werden. Innerhalb dieser Projekte sollten fachspezifische Arbeitsgruppen gebildet werden, die nach einem ersten Treffen ihre Arbeitsschwerpunkte für jeweils 1 Jahr festlegen. Diese Arbeitsgruppen sollten sich mindestens zweimal im Jahr treffen.

Zusätzlich sollte eine Übersicht erstellt werden, welche Institutionen in Deutschland im Bereich des Fahrzeugrecyclings überhaupt Transferleistungen und Know-how erbringen können. Um zu diesen Leistungen den Zugang zu erleichtern wäre eine Internetplattform aufzubauen, welche auch in den jeweiligen Landessprachen die wichtigsten Informationen bereithält. Auf dieser Plattform sollten auch wichtige Konferenzen, Tagungen und Netzwerkorganisationen aufgeführt werden, die sich mit den angesprochenen Themen befassen, beispielsweise:

Russland:

- International Ecological Forum
Waste Management: Technologies and Equipment
Russia, Saint-Petersburg
- WASMA/WASTE Management 2007
The 4th International specialized exhibition and forum of equipment and technologies for collection, processing and recycling
Moscow, Russia
- Wastetech
The 6th International Trade Show and Congress for Waste Management, Recycling and Environmental Technologies
Moscow, Russia

Polen:

- IV Ogólnopolska Konferencja Szkoleniowa
„Recykling pojazdów wycofanych z eksploatacji” (The Recycling of End-of Life Vehicles)

Diese Aktivitäten bieten gleichzeitig wiederum gute Anknüpfungspunkte, um die Ergebnisse und Erfahrungen aus Westeuropa zu verbreiten.

4 Maßnahmenfeld Elektro- und Elektronikschrott

4.1 Einleitung

Ziel der Untersuchung dieses Handlungsfeldes ist die Beschreibung und Quantifizierung des PGM-Einsatzes im Bereich elektrischer und elektronischer Anwendungen sowie der Umgang mit Elektrogeräten und Elektroaltgeräten (EAG)³⁹ und den Konsequenzen für die enthaltenen PGM am Ende der Nutzungsphase, um u.a. das Recyclingpotenzial zu ermitteln. Aus der Analyse von Materialströmen und Akteursstrukturen werden unterschiedliche Strategien und Instrumente zur verbesserten internationalen Kreislaufführung abgeleitet (siehe Abschnitt 5.2).

Die Auswahl dieses zweiten Handlungsbereichs neben den Autokatalysatoren ergibt sich aus einer integrierten Betrachtung der Relevanz der verschiedenen Anwendungsbereiche für PGM (vgl. Kap. 2). Die Ergebnisse zeigen, dass der Bereich Elektroaltgeräte neben den Autokatalysatoren das höchste Potenzial zur Schließung der PGM-Stoffkreisläufe aufweist. Die Untersuchungen konzentrieren sich beispielhaft auf die Produktbereiche Mobiltelefone und Bildschirme, um eine möglichst konkrete Adressierung der beteiligten Akteure zu ermöglichen. Für beide Bereiche Mobiltelefone und Monitore zusammen wurde für Deutschland beim gegebenen Stand der Technik ein zusätzliches theoretisches Recyclingpotenzial von ca. 0,75 t PGM berechnet, was die gesamte europäische Nettonachfrage für den Elektronikbereich übertreffen würde (vgl. JM 2010). Die ausgewählten Produktbereiche zeichnen sich durch unterschiedliche Ausgangslagen aus: Während Mobiltelefone in der Regel legal als funktionsfähige Gebrauchtgeräte mit einem positiven Marktwert exportiert werden, handelt es sich bei alten Bildschirmen häufig um illegale Exporte, bei denen die Exportkosten unter den Entsorgungskosten in Deutschland liegen, hierbei muss sowohl in Hinblick auf die Exportstrukturen als auch die PGM-Gehalte natürlich wieder zwischen verschiedenen Monitortypen unterschieden werden (LCD, Plasma, CRT etc.). Gleichzeitig sind sowohl bei Mobiltelefonen als auch bei Monitoren (getrieben vor allem durch den Generationswechsel von CRT zu Flachbildschirmen) neben Festplatten, die ebenfalls relevante Mengen an PGM enthalten, die höchsten Wachstumsraten im Markt zu beobachten.

Im Vergleich zum zweiten Untersuchungsfeld „Autokatalysatoren“ gibt es Unterschiede, vor allem mit Blick auf den Verbund mit anderen Sondermetallen, die beteiligten Akteure und den Umfang illegaler Aktivitäten.

³⁹ International werden Elektroaltgeräte unter der Bezeichnung WEEE geführt (für Waste Electrical and Electronic Equipment)

1. Im Gegensatz zu Autokatalysatoren kann das Thema PGM-Rückgewinnung aus EAG in Bezug auf Anreizstrukturen nicht weitgehend losgelöst von anderen Stoffen betrachtet werden: PGM sind in der Regel nicht das wertmäßig interessante Edelmetall in den Elektro-/Elektronikgeräten (meistens Kupfer, Gold oder Silber). Gleichzeitig bekommt das Thema aber auch eine zusätzliche Dimension, weil neben den Edelmetallen in Elektronikgeräten auch viele gesundheitsschädliche Substanzen wie Blei und Quecksilber enthalten sind.
2. Das Produkt- und Akteursspektrum ist deutlich komplexer. Während der Markt für Autokatalysatoren im wesentlichen von drei Herstellern (und einem ebenso oligopolistisch strukturierten Fahrzeugherstellermarkt) dominiert wird, die dementsprechend über einen sehr guten Marktüberblick verfügen, gibt es für EEE eine unüberschaubare Vielzahl von Produzenten.
3. Da beim Export von EEE nur schwer zwischen Gebrauchtgütern und EAG unterschieden werden kann, ist die Datenlage daher im Vergleich zu Gebrauchtwagenexporten als deutlich schlechter einzuschätzen. Häufig handelt es sich um graue Märkte, die von außen deutlich schwerer zu durchschauen sind..

Das Kapitel ist wie folgt aufgebaut: Kapitel 4.2 gibt einen kurzen Überblick über das Thema Elektro- und Elektronikgeräte mit einem Fokus auf IKT und Unterhaltungselektronik, die daraus resultierenden Schrotte, die technischen Möglichkeiten der Behandlung, Verwertung und des Recyclings sowie über die globale Problematik des WEEE-Exports. Kapitel 4.3 stellt die rechtlichen Rahmenbedingungen auf den unterschiedlichen regulativen Ebenen vor, die die Kreislaufführung von PGM maßgeblich beeinflussen. Kapitel 4.4 beschreibt die Probleme mit der Datenverfügbarkeit für diesen Bereich und analysiert die spezifischen Probleme der PGM-Verluste für Handys und Bildschirme. Kapitel 5.2 beschreibt und analysiert bestehende Ansätze zur Verbesserung des WEEE-Recyclings mit dem speziellen Fokus auf die PGM-Kreislaufführung.

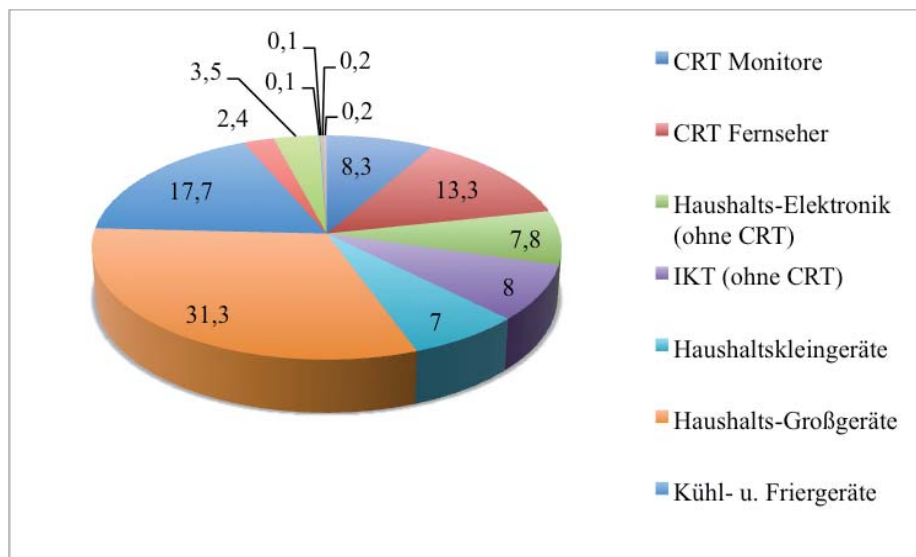
4.2 WEEE – ressourcenpolitische und ökologische Relevanz

Weltweit fallen nach UN-Angaben je nach Definition zwischen 20 und 50 Mio. Tonnen EAG⁴⁰ an. Global muss man davon ausgehen, dass davon nur etwa 10% überhaupt einem stofflichen Recycling zugeführt werden (vgl. LaDou et al. 2007).

⁴⁰ Im Rahmen dieser Studie soll im Folgenden der Definition von EAG nach EG-Elektroaltgeräte-Richtlinie 2002/96/EG gefolgt werden.

2006 fielen in der EU etwa 5,1 Mio. Tonnen Elektroschrott an, die unter die WEEE-Richtlinie fallen (vgl. UNU 2008). EAG machen damit etwa 4% der gesamten Haushaltsabfälle aus. Schätzungen gehen davon aus, dass diese Menge stärker als alle anderen Abfallfraktionen aus Haushalten wachsen und im Jahr 2020 etwa 12,3 Mio. t erreichen wird (vgl. ebd., 3).

Abb. 31: Zusammensetzung WEEE in der EU 2005



Quelle: UNU 2008

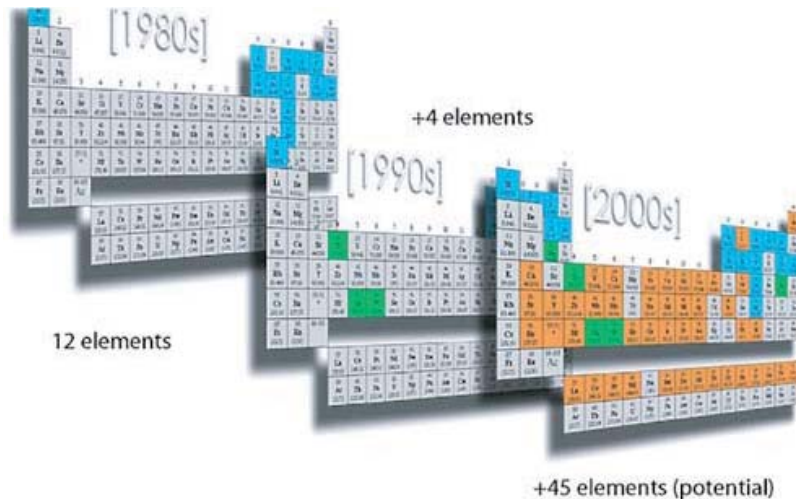
Global wächst das Aufkommen an WEEE etwa dreimal schneller als jede andere Form von Abfall (vgl. ebd.). Aufgrund der komplizierten Lebenszyklusketten mit einer Vielzahl beteiligter Akteure und der Vielzahl verschiedener Produkte, der extrem schnellen Veränderungen der genutzten Technologien, des Produktdesigns und der verwendeten Stoffe gehört er zu den komplexesten Abfallströmen. Mittlerweile finden über die Hälfte der chemischen Elemente des Periodensystems in unterschiedlichsten Zusammensetzungen Verwendung in Elektrogeräten.

4.2.1 IKT und UE als Treiber des Rohstoffverbrauchs

Eine wesentliche Produktgruppe unter den Elektrogeräten sind Anwendungen der Informations- und Kommunikationstechnologien (IKT) wie Handys und Festplatten sowie der Unterhaltungselektronik (UE), z.B. Videospielkonsolen. Laut OECD hatten die im Jahr 2004 global gehandelten IKT-Geräte einen Wert von 3,7 Billionen US-Dollar, was etwa 12,5% des Welthandels entspricht (vgl. Vickery 2008, 10). In Deutschland produ-

zierte die IKT-Branche⁴¹ im Jahr 2005 Waren und Dienstleistungen im Wert von 237 Mrd. Euro. Dazu kommt, dass mehr als die Hälfte der Industrieproduktion und 80% der Exporte vom Einsatz moderner IKT abhängen (vgl. BMU 2008, 2).

Abb. 32: Entwicklung der Anzahl chemischer Elemente in einem Intel-Computerchip



Quelle: Graedel 2006

4.2.1.1 Produktionsphase

Abb. 32 zeigt, wie sich innerhalb von nur zwei Dekaden durch technische Entwicklungen im Bereich IKT, hier dargestellt am Beispiel eines Computerchips, die Anzahl an eingesetzten chemischen Elementen erhöht hat. In den 80er Jahren waren es 12 Elemente, in den 90ern 16. Seit der Jahrtausendwende gab es einen dramatischen Anstieg um weitere 45 Elemente, so dass nun auf einer Hightech-Leiterplatte mehr als die Hälfte aller bekannten chemischen Elemente eingesetzt werden.

Der technologische Fortschritt im Bereich der Elektrogeräte, vor allem aber bei den IKT-Geräten, bewirkt, dass die tatsächliche Nutzungsdauer der Geräte deutlich unter den möglichen Funktionsgrenzen liegt, dieser Trend verschärft sich zunehmend (vgl. Culver 2005). Schätzungen gehen davon aus, dass jeder Haushalt in Deutschland im Laufe der nächsten 20 Jahre etwa 20 Mobiltelefone aussortiert, fünf Computer, jeweils vier DVD- und CD-Spieler sowie zwei Fernseher (vgl. Kühr 2008, 236).

⁴¹ Die Abgrenzung zur Branche Unterhaltungselektronik ist häufig fließend, so dass diese im Folgenden immer mitgemeint sein sollen.

Mit der massenhaften Verbreitung von IKT-Geräten sind erhebliche ökologische Belastungen und Risiken verbunden⁴². Der Material- und Energieverbrauch für die Produktion von Elektrogeräten ist im Verhältnis zu ihrem Gewicht im Vergleich zu anderen Produkten extrem hoch, da die in der Produktion verwendeten Komponenten extrem hohe Reinheitsgrade aufweisen müssen. Während in normalen industriellen Prozessen Reinheitsgrade in einer Spannbreite von 90-99% vorausgesetzt werden, beträgt die Vorgabe z.B. in der Halbleiterindustrie mindestens 99,999%. Daher benötigt beispielsweise die Produktion von Mikrochips für einen durchschnittlichen Computer (etwa 25g) 7,1 kg Chemikalien, 69 kg Edelmaterie, 281 Kwh Strom, 94 kg fossile Brennstoffe und 310 l Wasser, hinzu kommt der Materialaufwand bei der Rohstoffgewinnung. Das Verhältnis von Eigengewicht des Produkts und ökologischem Rucksack beträgt damit etwa 1:500 (vgl. Kühr 2008, S. 238).

4.2.2 PGM Einsatzbereiche im Elektro-/Elektronik-Bereich

Korrosionsbeständigkeit, Härte, Leitfähigkeit und hohe Schmelzpunkte machen Platingruppenmetalle zu einem wichtigen Werkstoff in der Elektronik. Als Kontaktwerkstoff werden sie in Schaltern, Relais sowie Gleit- u. Steckkontakten verwendet und bilden entweder als Legierung mit Kupfer oder Silber oder als Oberflächenbeschichtung für abriebfeste, elektrisch leitende Oberflächen. Hier herrscht aktuell eine hohe Nachfrage nach Palladium als Substitut für Gold und Silber, deren Preis extrem gestiegen ist. Im Bereich der Sensorik haben Platin und Rhodium als Thermoelemente wegen ihrer hohen Schmelzpunkte eine große Bedeutung, vor allem in Messwiderständen, ansonsten wird im Bereich EEE vor allem Palladium verwendet. Tab. 22 zeigt, dass von den 213t Palladium, die in 2008 weltweit verbraucht wurden, etwa 20% auf Elektronik-Geräte entfielen.

Tab. 22: Einsatzmengen an Palladium weltweit (in kg), netto (Brutto minus Recycling)

Verwendung	2008
Auto-Katalysatoren (netto)	99.800
Schmuck	26.600
EEE	41.200
Rest	45.400
Gesamt	213.000

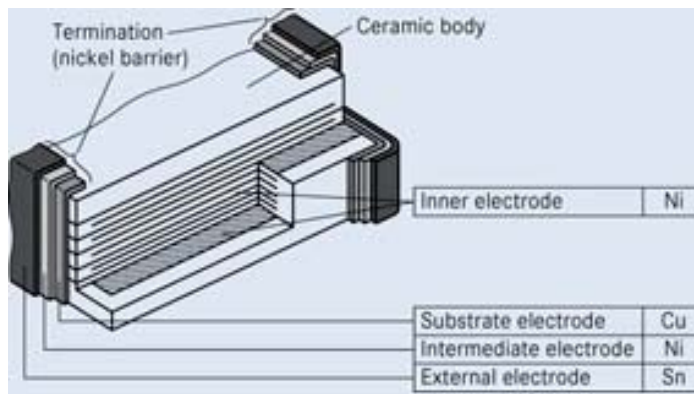
Quelle: JOHNSON MATTHEY 2009

⁴² Auch wenn IKT und elektronische Medien gleichzeitig Beiträge zur Erhöhung des Umweltbewusstseins sowie zur Entkopplung von Wirtschaftsleistung und Ressourcenverbrauch geleistet haben, vgl. BMU 2008, 3.

MLCC

Wichtigste Anwendung von Palladium im Elektronik-Bereich sind Vielschichtkondensatoren (MLCC = Multi Layer Ceramic Capacitor), die in großer Stückzahl als Entkoppelungselemente in Halbleiterbauelementen eingesetzt werden. MLCCs sind praktisch auf allen Leiterplatten in unterschiedlich großer Anzahl zu finden: Je komplexer das elektronische Gerät, desto höher die Zahl der benötigten MLCCs. Sie dienen der Speicherung von elektrischer Ladung und werden u.a. zur Aufrechterhaltung eines gleichmäßigen Stromes in integrierten Schaltkreisen verwendet. Sie ersetzen zunehmend Elektrolyt-basierte Kondensatoren, in denen Tantal eingesetzt wird, das wegen der stark gestiegenen Nachfrage aber sehr teuer geworden ist.

Abb. 33: Schematischer Aufbau eines MLCC



Quelle: Website epcos 2006

Die Innenelektroden von MLCCs wurden bisher überwiegend aus Palladium-Silber-Mischungen hergestellt. Die typische Zusammensetzung von AgPd-Elektroden in MLCC-Kondensatoren liegt bei 70:30 bzw. 95:5 (Stephenson et al. 2004). MLCC-Kondensatoren wiegen zwischen 0,00017 g und 0,45 g (ZVEI 2003). Auf bedruckten Leiterplatten (PWB) eingesetzt, macht Palladium etwa 0,15% des Gesamtgewichts aus (vgl. Scharnhorst et al. 2005, 552). Die Silber-Palladium-Elektroden verlieren aus Kostengründen zwar Marktanteile an Nickelektroden und in geringerem Maße auch Kupferelektroden, da sie aber über besondere Eigenschaften (z.B. nicht-magnetisch) verfügen, werden sie vor allem in hochwertigen Produkten auch weiterhin eingesetzt werden. Der Gebrauch von Nickel und Kupfer als alternative Basismaterialien wurde insbesondere in Japan und Nord-Amerika vorangetrieben. Nachteil der Umstellung auf preiswertere Materialien durch die sogenannte BME-Metallisierung (engl. base metal electrode) sind die deutlich verminderten guten elektrischen Eigenschaften wie beispielsweise erhöhte Spannungsabhängigkeit und die Verschlechterung des Impedanzverhaltens. Bei den Keramik Kondensatoren der Klasse 1 wird nach wie vor eine NME-Metallisierung (engl. noble metal electrode, dt. „Edelmetall-Elektrode“) bei-

behalten, da hier die Konstanz der elektrischen Werte entscheidend ist und dies nur durch die Verwendung von Palladium gewährleistet wird.

MLCC unterliegen einem dramatischen Prozess der Miniaturisierung, wodurch auch die Einsatzmenge an Palladium pro Bauteil deutlich gesunken ist. Dieser Effekt wird durch den steigenden Einsatz an elektronischen Anwendungen aber überkompensiert, so die Palladium-Einsatzmenge insgesamt auch weiter ansteigen wird. Treiber sind z.B. Handys mit eingebautem Fotoapparat oder auch Vielkern-Prozessoren in PCs (vgl. JOHNSON MATTHEY 2008, 8). Das Institut für Zukunftstechnologien hat den Rohstoffbedarf für MLCCs im Jahr 2030 abgeschätzt, danach steigt der globale Palladiumbedarf in diesem Bereich von derzeit 7,2t auf 9,22 bis 17,7t/a im Jahr 2030, vgl. Tab. 23:

Tab. 23: Globaler Rohstoffbedarf für miniaturisierte Kondensatoren, in Tonnen

Rohstoff	Weltproduktion 2006	Verbrauch 2006	Bedarfsvorschau 2030
Tantal	1.400	551	ca. 1400
Niob	44.500	288	ca. 1400
Barium	7.960.000	509	1250-3260
Titan	201.000	177	437-1140
Silber	20.200	210	ca. 400
Palladium	224	7	9,22-17,7
Mangan	11.900.000	109	266
Nickel	1.580.000	288	710-2030
Zinn	302.000	105	259-444
Antimon	134.000	28	ca. 68

Quelle: IZT/ ISI 2009

Darüberhinaus wird Palladium in Leiterpasten und für Widerstandselemente in Dick-schicht-Schaltungen eingesetzt. Platin findet Anwendung bei der Datenspeicherung in Laufwerken, als Barrierschichten und als Kontaktstellen auf Halbleitern (vgl. Hagelü-ken/ Meskers 2008).

PGM-haltige Elektrogeräte

Auf der Produktebene sind neben den näher untersuchten Bereichen Handys (siehe Kapitel 4.4.3) und Bildschirmen (siehe Kapitel 4.4.4) vor allem Festplatten für den PGM-Einsatz verantwortlich. Die Platten werden mit Platin beschichtet („besputtert“), trotz steigender Verkaufszahlen (+20% allein in 2007) sinkt die benötigte Menge aber, da immer feinere Schichten aufgetragen werden können. Durch das Perpendicular Recording-Verfahren zur Erhöhung der Speicherkapazität ist in den letzten Jahren vor allem die Nachfrage nach Ruthenium gestiegen, aber auch hier sinkt die Einsatzmen-ge aktuell schneller als die Produktnachfrage steigt (JOHNSON MATTHEY 2008, 19). Trotzdem macht der Elektrogeräte-Sektor mit 16t global etwa 65% der gesamten Ru-thenium-Nachfrage aus. PGM finden im IKT-Bereich vor allem in dissipativen bzw. nicht-demontagegerechten Formen Verwendung. Die Verteilung von geringen Mengen

in einer Vielzahl unterschiedlicher Produkte erschwert die Rückführung in Recyclingkreisläufen im Vergleich z.B. zum Autokatalysator erheblich.

Tab. 24 verdeutlicht die ökologische Relevanz des Palladium-Einsatzes für verschiedene Kategorien von Elektronikgeräten und unterstreicht dabei die Relevanz der ausgewählten Produktbereiche Bildschirme und Mobiltelefone.

Tab. 24: Anteilige ökologische Belastungen durch Gold, Silber und Palladium in verschiedenen Elektronikgeräten

Category	Gold Au	Silver Ag	Palladium Pd
Small household appliances	0.02%	0.00%	0.09%
IT and telecommunication excluding monitors	16.20%	0.32%	12.46%
CRT computer monitors	1.12%	0.06%	0.83%
LCD computer monitors	26.22%	0.22%	10.50%
Consumer electronics excluding TV sets	3.78%	0.09%	1.33%
CRT TV sets	7.62%	0.38%	5.84%
LCD TV sets	4.16%	0.06%	2.61%
Electrical and electronic tools	0.04%	0.00%	0.15%
Toys, leisure and sports equipment	0.69%	0.02%	0.10%

Quelle: Huisman et al. 2007

4.2.3 EAG-Behandlung und Recycling

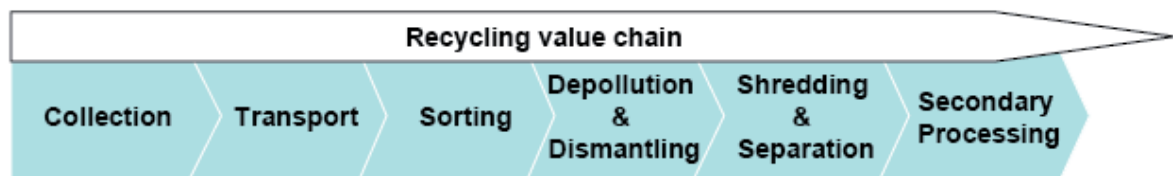
Bei der Kreislaufführung von PGM in EEE muss zunächst grundsätzlich zwischen der Produktions- und der Nachnutzungsphase unterschieden werden. In der Produktionsphase wird PGM im Elektronikbereich vor allem bei der Produktion von Glas-Displays eingesetzt. Da flüssiges Glas sehr hohe Temperaturen und äußerst aggressive chemische Eigenschaften aufweist, sind die Wände der Öfen mit einer Platin-Legierung ausgestattet. Während aber für diese Produktionsgeräte nahezu geschlossene Recyclingkreisläufe mit sehr geringen Verlusten etabliert wurden (bei Palladium bis zu 98%, vgl. Hagelüken et al. 2005, 50), sind die Rückgewinnungsquoten aus EAG – auch im Vergleich zum Autokatalysator – äußerst niedrig. Es handelt sich um „offene Produktkreisläufe“ (vgl. Hagelüken 2009), häufig mit einer intransparenten Vielzahl von Besitzerwechseln. Sowohl die unsachgemäße Entsorgung von EAG über den Hausmüll als auch der Export von Gebrauchtgüter und Altgütern führen dazu, dass für effiziente Recyclingstrukturen häufig der notwendige Input fehlt.

Bei vielen Altgeräten ist die Rückgewinnung der darin enthaltenen PGM selbst dann nicht gewährleistet, wenn sie den vorgesehenen Sammelsystemen zurückgeführt wird, da sich das Recycling – wenn es überhaupt statt findet – häufig auf die besonders rentablen Fraktionen Gold, Silber und Kupfer konzentriert (vgl. Saurat/ Bringezu 2008).

4.2.3.1 Technische Grundlagen

Das Recycling von PGM-haltigem WEEE-Schrott lässt sich allgemein in unterschiedliche Schritte unterteilen (vgl. Abb. 34).

Abb. 34: Die Recycling-Wertschöpfungskette von Elektroaltgeräten



Quelle: UNU 2008

Sammlung: Der entscheidende Schritt für eine hochwertige Verwertung mit Rückgewinnung der PGM ist zunächst eine möglichst hohe Sammelquote. Das WEEE-Aufkommen unterscheidet sich dabei deutlich zwischen unterschiedlichen Sammelsystemen, wobei Kombinationen aus Hol- und Bringsystemen sowie kontinuierlichen und temporären Systemen möglich sind. Bei allen Systemen spielt die Kommunikation mit den Haushalten eine zentrale Rolle. Die durchschnittlichen Kosten für die Sammlung pro Tonne sinken dabei mit steigendem WEEE-Aufkommen, bei einem Recyclinghof beispielsweise von ca. 550 Euro jährlich bei 60t bis auf ca. 150 Euro bei 300 t (vgl. Bohr 2007, 28).

Sortierung und Demontage: Bei der Sortierung werden in sehr geringen Umfang wiederverwendbare Geräte separiert, zum anderen aber auch solche Geräte separiert, die eine relevante Menge seltener Metalle (wie PGM) enthalten. Denn während über die Hälfte des WEEE-Aufkommens überhaupt keiner Demontage unterzogen werden, ist dieser Schritt für die PGM-Rückgewinnung absolut notwendig, um eine für eine rentable Rückgewinnung ausreichende PGM-Konzentration im Stoffstrom zu erzielen. Aufgrund der Vielzahl unterschiedlicher EEE-Produkte erfolgt die Demontage in den allermeisten Fällen noch manuell.

Schreddern: Anschließend wird der WEEE-Schrott geschreddert und sortiert. Besonders die Sortiertechnologie hat in den letzten Jahren erhebliche Fortschritte gemacht, neben den herkömmlichen Magnet- oder Wirbelstromscheidern gewinnen auch optische Erkennungsverfahren und Flotationsanwendungen für die Schredderleichtfraktion an Bedeutung (vgl. Magalini 2007).

In einem österreichischen Forschungsprojekt (vgl. Salhofer/ Spitzbart 2009) wurden die Rückgewinnungsquoten für Edelmetalle bei der Behandlung von Leiterplatten aus PCs mit unterschiedlichen Verfahren untersucht: Zum einen die heute routinemäßige händische Hauptzerlegung, bei der die Motherboards als direkt zugängliche Leiterplatten und offen liegende Kontakte entnommen werden, zum anderen eine vertiefte Zer-

legung, bei der zusätzlich Festplatten, Laufwerke und Netzteile demontiert werden, um die in ihnen enthaltenen Leiterplatten zu entnehmen. Diese Ergebnisse wurden mit einer hochwertigen mechanischen Aufbereitung verglichen, bei der die PCs zunächst in einem Smasher in ihre Bauteile zerlegt werden und wertstoff- und schadstoffhaltige Bauteile anschließend auf einer Sortierstrecke händisch aussortiert werden. Die wertstoffhaltigen Fraktionen werden geschreddert und durch verschiedene Trennverfahren (Magnetscheider, Sink-Schwimm-Anlage, Wirbelstromscheider, Jigger etc.) sortiert. Für alle drei Verfahren wurden Massenbilanzen erstellt, die die Verteilung einzelner Stoffe auf die Outputfraktionen darstellen.

Tab. 25: Gehalte und Rückgewinnungsraten von Edelmetallen aus Leiterplatten durch Demontage bzw. mechanische Aufbereitung

	Gehalt in ppm	Hauptzerlegung	Vertiefte Zerlegung	Mechanische Aufbereitung
Ag	91	49%	92%	75%
Au	23	80%	97%	70%
Pd	9	66%	99%	41%

Quelle: Salhofer et al. 2009

Die Ergebnisse zeigen, dass die vertiefte Zerlegung bei den wertbestimmenden Komponenten Gold und Silber hohe Rückgewinnungsraten (92 bzw. 97%) erreichen kann. Für Palladium erreicht man allerdings auch in einer hochwertigen mechanischen Behandlungsanlage wie der hier untersuchten nur Rückgewinnungsraten von 41%. Hier erzielt schon die manuelle Hauptzerlegung ein um mehr als 50% besseres Ergebnis. Die vertiefte Zerlegung erreicht fast eine vollständige Ausschöpfung des Potenzials der Rückgewinnung der untersuchten Edelmetalle. Für Palladium wird sogar eine höhere Rückgewinnungsrate als für Gold und Silber, nämlich 99%, erzielt (vgl. Salhofer et al. 2009, 27).

Der aktuell in der Abfallwirtschaft eingesetzte Stand der Technik bei der Behandlung von EAG wurden auch von Chancerel et al. (2008) untersucht⁴³. Für WEEE der Kategorien IKT und Unterhaltungselektronik haben ihre Analysen ergeben, dass pro Tonne Gold im Wert von 359 Euro und Palladium im Wert von 47 Euro enthalten sind. Danach geht ein Großteil der 7,16g Palladium pro Tonne E-Schrott (ca. 75 %) aber verlo-

⁴³ Dazu wurde eine Anlage mit vollständiger händischer Demontage untersucht sowie eine Anlage, bei der nur die einfach demontierbaren Leiterplatten entfernt wurden. Die vollständigen Ergebnisse sowie der jeweilige Versuchsaufbau sind in Chancerel et al. 2009 dokumentiert.

ren, weil er überhaupt nicht in der edelmetallhaltigen Fraktion erfasst wird. 33% des Palladiums verteilen sich beispielsweise im Output auf die Plastikfraktion und gehen damit nicht in ein Recycling.

Recycling: Abschließend werden die PGM-haltigen Stoffströme weiter aufkonzentriert, um dann entweder in einer Kupferschmelze oder speziellen Recyclinganlagen (z.B. Hoboken) metallurgisch zurück gewonnen zu werden. Bei diesem Schritt können Rückgewinnungsquoten von bis zu 98% erzielt werden, die gewonnen Sekundärrohstoffe sind qualitativ nicht von Primärrohstoffen zu unterscheiden.

Abb. 35: Metallverteilung in einem E-Schrott-Schredder in Deutschland

Metal						
	Iron	Copper	Silver	Gold	Palladium	
Metal content per ton WEEE	401,92 kg	43,51 kg	313,32 g	22,24 g	7,16 g	
Metal concentration in the output fractions						
Output	Aluminium	1%	3%	2722 g/ton	16 g/ton	3 g/ton
	Ferrous metals	86%	1%	329 g/ton	27 g/ton	5 g/ton
	Metal composites	58%	14%	22 g/ton	2 g/ton	1 g/ton
	Other material	10%	2%	104 g/ton	6 g/ton	7 g/ton
	Plastics	0%	4%	342 g/ton	24 g/ton	9 g/ton
	Precious-metals rich material	30%	10%	392 g/ton	64 g/ton	20 g/ton
Mass distribution over the output fractions						
Output	Aluminium	0%	2%	19%	2%	1%
	Ferrous metals	71%	6%	35%	40%	23%
	Metal composites	18%	40%	1%	1%	2%
	Other material	4%	8%	6%	4%	17%
	Plastics	0%	24%	29%	29%	33%
	Precious-metals rich material	6%	20%	11%	24%	24%
Sum	100%	100%	100%	100%	100%	

Quelle: Chancerel et al. (2008)

4.2.3.2 Ökologische Bewertung des PGM-Recyclings

Tab. 26 veranschaulicht die ökologische Relevanz des PGM-Recyclings. Hier sind unterschiedliche Indikatoren für die Umweltbelastung durch die Produktion einer Tonne PGM aus der Primär- und der Sekundärroute gegenübergestellt. Im Vergleich zur Minenproduktion verursacht aus Elektroschrott gewonnenes Sekundär-PGM nur ein Neuntel der $\text{CO}_{2\text{eq}}$, einen um einen Faktor 41 geringeren TMR und sogar um den Faktor 216 geringere SO_2 -Emissionen.

Tab. 26: Umweltbelastungspotenziale in der Primär- u. Sekundärgewinnung von Platingruppenmetallen

	PGM	Platin	Palladium	Rhodium
Primärproduktion				
in t/ t PGM				
CO_{2eq}	23.451	39.892	7.221	46.829
SO_{2eq}	1.792	1.942	1.545	2.308
TMR	388.602	683.564	99.891	802.707
Sekundärproduktion				
in t/ t PGM				
CO_{2eq}	1.851	2.875	788	3.322
SO_{2eq}	17	26	7	30
TMR	5.627	8.738	2.394	10.096

Quelle: Saurat/ Bringezu 2008

Bei diesen Berechnungen muss natürlich auch berücksichtigt werden, dass die Sammlung von WEEE mit ökologischen Belastungen, vor allem durch den Transport von der Sammelstelle zum Behandler und von dort zum Recycler, verbunden sind. Die Umweltbelastungen entlang des gesamten Lebenszyklus sollten dafür nicht nur die Belastungen in der Nutzungsphase, sondern auch die End of Life-Phase im Sinne eines Cradle to Cradle-Ansatzes berücksichtigen. Barba-Gutierrez et al. (2009) haben für unterschiedliche Aspekte der Umweltbelastung untersucht, bis zu welchem Transport-Radius ein Recycling noch ökologisch vorteilhaft ist. Ihre Ergebnisse auf Basis der Eco-Indicator99-Methodik zeigen, dass für vier Wirkungskategorien (Respiratory Inorganics, Fossil Fuels, Acidification/Eutrophication und Radiation) diese Grenze relativ schnell erreicht ist, insgesamt kann aber festgehalten werden, dass ein hochwertiges Recycling von WEEE auch bei längeren Transportdistanzen mit deutlichen ökologischen Vorteilen gegenüber einer Entsorgung über den Restabfall verbunden ist.

4.2.3.3 Status Quo PGM-Rückgewinnung aus WEEE-Recycling

Die Menge an Sekundär-PGM aus dem WEEE-Bereich ist in den letzten Jahren aufgrund gesetzlicher Vorgaben zur Erfassung und Behandlung EAG sowie der Preisentwicklung für PGM kontinuierlich gestiegen. Allerdings unterscheidet sich die Recyclinginfrastruktur und die Recyclingrate zwischen den OECD-Ländern und Ländern wie China deutlich. Dort entspricht der technische Standard der Behandlung und des Recyclings bei weitem nicht dem technologischen Niveau wie beispielsweise der Anlage von UMICORE in Hoboken, von Aurubis in Hamburg oder von Boliden in Schweden, so dass häufig auch nur die wertvollsten Komponenten wie Gold und Kupfer zurück gewonnen werden und das PGM mit dem Restmaterial deponiert wird (vgl. Hagelüken 2009).

Für die EU25 plus Norwegen und die Schweiz schätzen Saurat und Bringezu, dass im Jahr 2004 etwa 8,5t PGM aus WEEE-Schrott zurück gewonnen werden konnten (vgl. Saurat/ Bringezu 2008). Allerdings basiert diese Rechnung auf einer Sammelquote

PGM-haltiger WEEE-Schrotte von 50% der auf den Markt gebrachten Geräte, was zumindest bei IKT nur UE nur in Einzelfällen zu erreichen sein dürfte.

Analysen der Recyclinginfrastrukturen in Entwicklungsländern zeigen, dass diese so gut wie nirgends europäischen Mindestanforderungen an den Umwelt- oder Gesundheitsschutz entsprechen (vgl. Sander/ Schilling 2010). Für einige Fraktionen wie Kupfer und Gold existieren zwar teilweise Anlagen, allerdings fehlt es in der Regel an den entsprechenden Redistributionssystemen, um die Altgeräte tatsächlich diesen Anlagen zuzuführen. Zwar führt die händische Zerlegung in der ersten Stufe zu einer guten Separation der Materialien und Bauteile, allerdings nur für diejenigen, die auf den jeweiligen regionalen Märkten auch abgesetzt werden können. Für PGM muss davon ausgegangen werden, dass durch die Praxis des Abtrennens über offenen Feuern zur Kupfergewinnung die Rückgewinnungsrate zumindest in Afrika bei Null liegt (vgl. ebd., 52).

4.2.4 Exporte von gebrauchten Elektrogeräten und Elektroaltgeräten

4.2.4.1 Exportierte Mengen

Gebrauchte Elektrogeräte verlassen zu „einem hohen Prozentsatz“ (Weiland-Wascher/ Wuttke 2007, 440) den europäischen Wirtschaftsraum, wobei es sich häufig um illegale Verbringung von Elektroschrott handelt. Der Export von Elektro- und Elektronikschrott ist dabei laut Abfallverbringungsverordnung nur erlaubt, wenn folgende Punkte in den Zielländern gewährleistet sind:

1. die beste verfügbare Technologie für die Behandlung, Wiederverwendung und das Recycling
2. Anwendung einer selektiven Behandlung in Übereinstimmung mit Anhang II der WEEE-Direktive,
3. Genehmigungen, die denen in Europa entsprechen und mit den technischen Erfordernissen wie in Anhang III übereinstimmen sowie
4. gleiche gesetzliche Regelungen bezüglich der Sicherheit, gesundheitlichen Unbedenklichkeit sowie in Hinblick auf das Abfallbeseitigungsgesetz wie in Europa.

Exakte Mengenangaben sind äußerst schwierig zu ermitteln, da zum einen die Außenhandelsstatistik nicht zwischen Gebrauchsgütern und Neuwaren unterscheidet und zum anderen die Abgrenzung zwischen Produkt und Abfall häufig sehr schwierig ist. Über den Hamburger Hafen werden laut (Sander, Schilling 2010) ca. 150.000 t/a gebrauchte Elektrogeräte, davon über die Hälfte Monitore und Fernseher, aus Deutschland exportiert. Untersuchungen aus den Niederlanden haben gezeigt, dass etwa 20% der gebrauchten Fernseher illegal gesammelt und exportiert werden, wovon etwa 50-90% als Elektroschrott einzustufen gewesen wären (Beck 2007, 20).

Nach einer von der UNU (2008) veröffentlichten Studie werden in der EU von den jährlich insgesamt 8,7 Mio. Tonnen E-Schrott nur 2,1 Mio. Tonnen (davon etwa ein Drittel in Deutschland) in nach der WEEE-Richtlinie auf Ebene der Mitgliedstaaten eingerichteten Systemen gesammelt und verwertet, d.h. dass über 75% exportiert oder auf anderen illegalen Wegen entsorgt werden (während in der EU jährlich etwa 15-20 kg Elektrogeräte pro Einwohner der EU auf den Markt kommen, werden aber nur zwischen 3 und 5 kg Altgeräte - in Deutschland zwischen 6,3 und 8,7kg - eingesammelt). Die Hauptmassenströme wie Eisen und Kupfer werden auch in diesen Systemen größtenteils recycelt, für das PGM-Recycling stehen diese Produkte dann aber in der Regel nicht mehr zur Verfügung.

Auf der Angebotsseite handelt es sich um eine Vielzahl unterschiedlicher Quellen, die sich jeweils durch unterschiedliche Stückzahlen, Qualitäten und dementsprechend auch Preise auszeichnen. 2007 wurden 6.856t WEEE aus Deutschland exportiert (vgl. Janz et al. 2009), was eine Minderung um fast zwei Drittel gegenüber dem Vorjahr bedeuten würde. Janz et al. (2009) vermuten, dass die Menge an illegalen Exporten, die nicht durch die Statistik der ear erfasst ist, um ein Vielfaches höher liegt. Frühere Studien der Deutschen Umwelthilfe (DUH, 2007) berichten von einzelnen Akteuren, die alleine jährlich 12.000t Computer-Monitore über den Hamburger Hafen nach Asien exportieren.

Die Dunkelziffer an Exporten, die als Gebrauchtgüter deklariert werden, bei denen es sich aber tatsächlich um WEEE handelt, kann nur grob geschätzt werden. Janz et al. (2009) haben dazu in 29 Kommunen in Nähe der ostdeutschen Grenze insgesamt 81 Wertstoffhöfe, kommunale Entsorgungsanlagen und Abfallbehörden befragt. Die Ergebnisse zeigen, dass besonders edelmetallhaltige Elektroaltgeräte abgegriffen und über den Landweg nach Osteuropa exportiert werden. Janz et al. schätzen das Exportvolumen über den Landweg nach Osteuropa auf eine Spanne von 36.000 bis 122.000t WEEE pro Jahr (ebd., 128). Die Ergebnisse zeigen auch, dass die Menge an EAG entscheidend vom Sammelsystem, der Art der Sammlung, der Öffentlichkeitsarbeit der Kommune sowie dem Einsatz der Ordnungsämter abhängt. So werden die Mengen bei individuellen Abholterminen von den Befragten deutlich niedriger als bei vorab bekannten Abholtermine für ganze Straßenzüge geschätzt. Experten berichten allerdings auch, dass professionelle Sammler das Tourensystm der Abfallbehörden sehr genau analysieren und es so auch bei gebündelten, individuellen Terminen zu massiven Diebstählen kommt, was letztendlich auch die Schließung von PGM-Stoffkreisläufen behindert, wenn diese Geräte nicht hochwertigen Recyclingstrukturen zugeführt werden.

Tab. 27 gibt einen Überblick über die Mengenrelevanz unterschiedlicher Quellen, aus denen gebrauchte Elektrogeräte und EAG stammen, die exportiert werden. Die häufig genannten Flohmärkte spielen mengenmäßig wahrscheinlich nur eine untergeordnete Rolle, werden aber häufig von den Akteuren selber genannt, weil dort keine Rechnungen ausgestellt werden und somit der Verbleib der Ware nicht nachvollzogen werden kann. Wertkaskaden, bei denen gebrauchte Geräte an Händler verkauft werden, sind

wahrscheinlich besonders für Handys relevant. Hier gibt es eine unüberschaubare Anzahl von Akteuren am Markt, was eine belegbare Mengenabschätzung besonders erschwert. Die gewerblichen Reseller sind dagegen hauptsächlich auf den Bereich sog. Weißer Ware spezialisiert.

Tab. 27: Mengenabschätzungen für Export-Quellen für gebrauchte Elektrogeräte und EAG aus Deutschland

Quelle	Menge
Diebstahl bei der Sperrmüllsammlung	10.000 - 100.000 t/a
Schrottsammlung	10.000 - 100.000 t/a
Online Anzeigen/ Auktionshäuser	10.000 - 50.000 t/a
Gewerbliche Reseller	50.000 - 100.000 t/a
Flohmärkte	bis zu 10.000 t/a
Re-Use-Organisationen	bis zu 10.000 t/a
Wertkaskaden	bis zu 50.000 t/a

Quelle: Sander/ Schilling 2010

4.2.4.2 Exportstrukturen

Ziel der Exporte sowohl von Gebraucht- als auch Altgeräten sind nach Einschätzungen von Experten (vgl. Sander/ Schilling 2010) vor allem einzelne Regionen in China und Indien sowie Nigeria und Ghana, von wo die Geräte entweder als Secondhandware weiter verkauft oder einem informellen Recyclingsektor zugeführt werden, in dem sowohl Technik als auch Umweltschutzbestimmungen deutlich unter dem Standard der Industrieländer liegen.

Abb. 36: Transportwege für WEEE und Schrottschiffe in Südostasien



Quelle: Le Monde diplomatique 2007

Ein großer Anteil der Elektrogeräte-Exporte findet per Schiff statt. Etwa 15% aller Schiffstransporte innerhalb der EU haben Abfälle als Ladung (IMPEL 2008, 6), in den meisten Fällen sind dies legale Transporte, u.a. von gebrauchten EEE. Bereits 1994 hat die EG Regeln für die Überwachung und Kontrolle von Abfallverschiffungen erlassen, basierend auf entsprechenden Regeln der OECD und dem Basler Übereinkommen.

Bei Untersuchungen von Abfallverschiffungen im Zeitraum 1/2007 bis 2/2008 wurden bei 15% Verstöße gegen das geltende Abfallrecht festgestellt. Die Verstöße umfassten administrative Vergehen (z.B. unvollständige oder gefälschte Papiere) als auch in 40% der Fälle illegale Abfallverbringungen. In 30 der untersuchten 318 Fälle waren Elektroschrotte involviert; bezogen auf die illegalen Abfallverbringungen waren sie die mit Abstand häufigste Abfallfraktion. Die Untersuchungen haben gezeigt, dass ein einheitliches Niveau der Umsetzung der EG-Abfallverbringungsverordnung noch nicht erreicht ist. Insgesamt wurde aber generell ein erhebliches Kapazitätsproblem im Vollzug festgestellt (ebd., 26).

Auch in den Zielländern existieren erhebliche Vollzugsdefizite. Grundsätzlich ist der Import von alten Elektro- und Elektronikgeräten nach China seit 2000 verboten, das betrifft wegen ihres Schadstoffpotentials besonders die PGM-haltigen Leiterplatten und damit besonders UE und IKT (vgl. Yoshida 2005). Ebenso ist offiziell eine Untersuchung aller Abfälle vor der Entladung sowie eine Genehmigung der chinesischen Umweltbehörde notwendig, um WEEE behandeln zu dürfen. Allerdings besteht in China besonders im Abfallbereich ein großes Vollzugsdefizit und gleichzeitig wird der Import nach China von Secondhand-Elektrogeräten steuerlich begünstigt, ohne dass die Herkunft dieser Geräte überprüft werden könnte (vgl. Shinkuma/ Huong 2008).

In Nigeria schreibt der „Harmful Waste Decree 42“ von 1988 vor, dass Abfälle zur Verwertung nur nach einer Genehmigung des nigerianischen Umweltministeriums eingeführt werden dürfen, eine spezielle Regelung für Elektronikschrott existiert jedoch nicht. Allerdings wurde eine solche Genehmigung nach Angaben des Ministeriums noch nie beantragt. Trotzdem erreichen jeden Monat etwa 500 Container mit Elektrogeräten aus unterschiedlichen Ländern Nigeria. Die Angaben zu den davon noch funktionstüchtigen Geräten schwanken zwischen 25 und 75% (vgl. Osibanjo 2009), allerdings ist unklar, welcher Anteil davon bereits als EAG verschifft wurde. Etwa 45% der Geräte kommen aus Europa, etwa die gleiche Menge aus den USA. Bei den jährlichen Mengen von etwa 60.000t handelt es sich bei ca. 15.000-45.000t um gefährliche Abfälle (vgl. ebd.).

Ein besonderes Problem in Nigeria ist das Ausmaß der Korruption bei den Zollbehörden. Die Regierung hat daher das Zollverfahren umgestellt und zusätzlich drei internationale Prüfgesellschaften engagiert (vgl. Mafels 2006).

Im Hafen von Lagos gibt es zwei große Umschlagplätze für Elektrogeräte, den Alaba Market und das Computer Village (vgl. Sander/ Schilling 2010). Im Hafen werden die unterschiedlichen Geräte nach einem „grading system“ sortiert: Reparierbare und funktionstüchtige Geräte werden von Altgeräten unterschieden, die vor allem an informelle Schrotthändler verkauft werden. Diese versuchen mit einfachsten Mitteln und Methoden, einzelne Fraktionen wie Kupfer aus den Geräten zu gewinnen, dazu gehört z.B. das Abbrennen von Kabelumhüllungen.

4.2.4.3 Umweltschäden durch unsachgemäße Behandlung, Recycling und Ablagerung

In China⁴⁴ und anderen Ländern führt nicht nur die unregelmäßige Deponierung von WEEE zu Umweltproblemen, sondern vor allem unsachgemäße Behandlung und Recycling, insbesondere der Leiterplatten (vgl. Shinkuma/ Huong 2008).

Eine Studie von Greenpeace International (vgl. Bridgen et al. 2005) hat mehr als siebenzig Ablagerungs- und Verarbeitungsstätten für WEEE in China und Indien untersucht und belegt, dass auf allen Stufen der WEEE-Behandlung giftige Schwermetalle und organische Schadstoffe in die Umwelt gelangen und die Arbeiter belasten.

Als besonders umweltbelastende Arbeitsschritte im Behandlungs- und Verwertungsprozesse erweisen sich das Lösen der integrierten Schaltkreise von den Leiterplatten durch starke Säuren, wobei die Abwässer ungefiltert in die Flüsse oder das Grundwasser fließen, sowie das offene Verbrennen der Leiterplatten, um die Edelmetalle, vor allem Kupfer, Gold und Silber, vom Plastik zu trennen. Ein besonderes Problem stellen die brandgehemmten Plastikanteile in EEE dar, die etwa 11% des Kunststoffanteils ausmachen. (Vehlow et al. 2003).

4.2.4.4 Soziale Dimension der Exporte gebrauchter Elektronikgüter

Gleichzeitig muss aber auch berücksichtigt werden, dass der (legale) Import von gebrauchten Elektrogütern eine stetig steigende Nachfrage nach günstigen Elektro- und Elektronikgeräten, vor allem im IKT-Bereich, befriedigt. Der „digitale Graben“ (van den Pol 2004) zwischen den Industrienationen und Entwicklungsländern behindert massiv deren ökonomische Entwicklung, so hatten 2003 in Afrika nur ca. 5% der Bevölkerung Zugang zum Internet.

Wegen der fehlenden Festnetzanschlüsse spielt vor allem das Handy eine entscheidende Rolle für die Entstehung funktionierender Märkte. Einer Studie der UN zufolge ist das Handy das wichtigste Kommunikationsmedium für Unternehmer in Afrika, rechnerisch benutzt mittlerweile jeder zweite Bewohner eines Entwicklungslandes ein Handy, 2005 war es erst jeder Vierte (vgl. UN 2008). Donner/ Escobari (2010) haben die

⁴⁴ Als Zentrum des WEEE-Recyclings in China gilt die Stadt Guiyu in der Provinz Guangdong, die an den Hafen von Hongkong angrenzt und gleichzeitig in der Nähe der Millionenstädte Guangzhou und Shenzhen liegt. 2004 hatte die chinesische Regierung zwar angekündigt, in Guiyu einen hochwertigen Recycling-Park errichten zu wollen, bis Ende 2007 ist damit aber noch nicht begonnen worden (ebd., 17).

Effekte des Einsatzes von Mobilfunkgeräten auf die Entwicklung von Märkten in Entwicklungsländern untersucht und betonen deren Beitrag zur Effizienz⁴⁵.

Und auch der illegale Import von Elektroschrott bietet einer steigenden Zahl von Menschen in den Zielländern Beschäftigungschancen, auch wenn sowohl über die Anzahl dieser Arbeitsplätze als auch die dort vorherrschenden Umwelt- und Gesundheitsstandards verlässliche Zahlen weitgehend fehlen. Entscheidend wird sein, in diesen Ländern Mindeststandards für den Umweltschutz und die Sicherheit am Arbeitsplatz zu definieren und auch durchzusetzen.

Das vollständige und tatsächlich auch vollzogene Verbot für den Import von WEEE nach China würde nach Meinung von Experten das Geschäft völlig in die Illegalität oder in andere Entwicklungsländer verdrängen und somit vor allem die vereinzelt Recycler treffen, die sich zumindest ansatzweise an westlichen Sicherheits- und Gesundheitsstandards orientieren (vgl. Shinkuma/ Huong 2008).

4.2.4.5 Anreizstrukturen Exporte

Sander und Schilling (2010) haben die Preissituation für gebrauchte Elektronikgeräte in den Empfängerstaaten untersucht, um einen Eindruck von den ökonomischen Anreizstrukturen zu gewinnen. TV-Monitore mit einer Bildschirmdiagonalen zwischen 14 und 17 Zoll erzielten danach auf dem Markt in Lagos in guter Qualität noch Preise von 25 Euro, in schlechter Qualität von 10 Euro. Bei Fernsehern reicht die Spanne je nach Qualität und Größe von 20 bis 40 Euro. Aber selbst für nicht mehr funktionstüchtige CRT-Monitore werden Preise zwischen 2 und 3 Euro gezahlt.

Tab. 28 zeigt die unterschiedlichen Ankaufpreise für 1.000kg bedruckte Leiterplatten, die in Deutschland als gefährlicher Abfall entsorgt werden müssten. Hier würden professionelle Aufkäufer umgerechnet bis zu 200\$ für Leiterplattenschrott bezahlen⁴⁶, ein autorisierter Recycler in China zahlt danach pro Tonne etwa 250\$, ein illegaler Recycler in Guiyu, der an keinerlei Sozial- oder Umweltstandards gebunden ist, kann dagegen bis zum 7fachen diese Preises zahlen. Die großen Preisunterschiede verdeutlichen die Dimension der ökonomischen Anreizstrukturen.

⁴⁵ So hat z.B. der Einsatz von Mobiltelefonen bei Kleinunternehmern in Niger dazu geführt, dass die Preisspanne bei Getreide um 21% verringert werden konnte, so dass die Getreidehändler ihren Anteil am Gewinn gegenüber den international agierenden Handelsorganisationen um 29% steigern konnten, vgl. Donner/ Scobari 2010, 641ff.

⁴⁶ Für speziell vorsortierte Leiterplatten, z.B. Rückwände + Kontaktleisten aus Computern/Großrechnern mit deutlich sichtbare Goldkontakten werden jedoch auch bis zu 9.000 Euro/t bezahlt, vgl. <http://www.scheideanstalt.de/informationen/aktuelle-ankaufskurse/elektroschrott-preise-und-sortierkriterien/>

Tab. 28: Ankaufspreise für eine Tonne Leiterplatten-Schrott 2006

Deutschland	Guiyu	Autorisierter Recycler in Hangzhou (China)
200 \$	420 – 1900 \$	250\$

Quelle: Shinkuma/ Huong 2008, eigene Berechnungen

Den Erlösen in den Zielländern gegenüber stehen die Transportkosten von Deutschland in das Zielland. Abhängig von Konjunkturlage und Route kostet ein 40-Fuß-Seecontainer nach Westafrika inklusive aller „handling fees“ etwa 1.500 Euro. Je nach Verpackung und Verstaung können in einem solchen Container bis zu 900 CRT-Monitore transportiert werden. Damit ergibt sich ein rentabler Ankaufspreis von 8 Euro für einen CRT TV, selbst wenn man für die Personalkosten pauschal noch etwa zusätzlich 30% des Marktpreises annimmt. Die Untersuchungen haben darüber hinaus ergeben, dass vor allem Ersatzteile im Vergleich zu Deutschland einen relativ guten Preis erzielen: Speicherchips mit 256 MB, die in Deutschland in Neugeräten schon seit langem überhaupt nicht mehr eingesetzt werden, können in Lagos noch für bis zu 10 Euro veräußert werden (vgl. ebd., 58).

4.3 Rechtlicher Rahmen

In diesem Kapitel sollen die rechtlichen Rahmenbedingungen für die Behandlung und den Export von WEEE dargestellt werden. Dabei müssen verschiedene Regulierungsebenen unterschieden werden: Völkerrechtlich, EU-weit und national. Ein besonderer Fokus liegt dabei auf Anreizstrukturen, die sich auf die Rückgewinnungsraten von PGM und den Export von PGM-haltigen Altgeräten auswirken.

4.3.1 Basler Übereinkommen

Das 1989 verabschiedete „Basler Übereinkommen über die Kontrolle der grenzüberschreitenden Verbringung gefährlicher Abfälle und ihrer Entsorgung“ hat dazu geführt, dass heute quasi keine Abfälle zur Beseitigung mehr aus der EU exportiert werden: Zentrales Element war die Verpflichtung des Exportstaates, vor einer grenzüberschreitenden Abfallverbringung die schriftliche Zustimmung des Importstaates sowie gegebenenfalls von Durchführstaaten einzuholen (vgl. Buck/ Helm 1999, 1). Hingegen haben die Exporte von Gebrauchsgütern und von Abfällen zur Verwertung erheblich zugenommen.

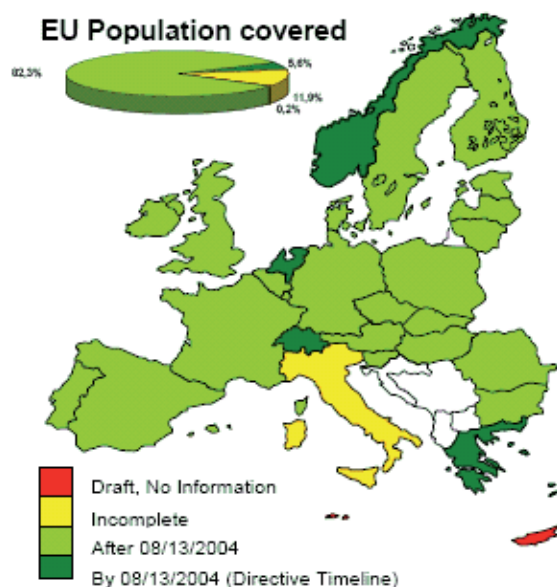
4.3.2 EG-Elektroaltgeräte-Richtlinie

Auf europäischer Ebene wurde im Jahr 2002 die EG-Richtlinie 2002/96/EG über Elektro- und Elektronikgeräte verabschiedet. Ziel ist das Vermeiden, Verringern sowie um-

weltverträgliche Entsorgen der zunehmenden Mengen an Elektronikschrott durch eine erweiterte Herstellerverantwortung für die Produkte. Die Verpflichtung, für die Entsorgung, d.h. für die Entsorgung der Geräte Verantwortung zu übernehmen, soll die Hersteller dazu zwingen, den gesamten Lebenszyklus ihrer Produkte in ihre Kalkulation einzubeziehen.

Die EU-Richtlinie ist im Januar 2003 in Kraft getreten. Bis 18. August 2005 sollten die EU-Mitgliedstaaten die Richtlinie in nationale Gesetze umgesetzt und ein nationales Rücknahmesystem aufgebaut haben. Seit Dezember 2006 müssen mindestens 4 kg Elektronikschrott pro Einwohner und Jahr gesammelt werden. Darüber hinaus werden für die Behandlung – differenziert nach verschiedenen Gerätekategorien – massenbezogene Verwertungs- und Recyclingquoten vorgeschrieben. Spezifische Verwertungsquoten für PGM oder PGM-haltige Altgeräte sind in der Elektroaltgeräte-Richtlinie ebenso wenig enthalten wie spezifische Demontagepflichten für PGM-haltige Bauteile, allerdings schreibt Annex II der Richtlinie die Demontage von Leiterplatten vor, bei Mobilfunkgeräten in jedem Fall, ansonsten wenn die Leiterplatte eine Oberfläche von mindestens 10cm² aufweist.

Abb. 37: Umsetzung der WEEE-Direktive im Jahr 2007



Quelle: UNU 2008, 5

Die WEEE-Richtlinie unterscheidet folgende Gerätekategorien: relevante Mengen an PGM sind vor allem in den Klassen 3 und 4 zu erwarten.:

1. Große Haushaltgeräte (Backofen, Kühlschrank usw.)

2. Kleine Haushaltgeräte (Toaster, Staubsauger usw.)
3. Büro und Kommunikation (PC, Drucker, Telefon, Fax usw.)
4. Unterhaltungselektronik (TV, HiFi, portabler CD-Player usw.)
5. Leuchtmittel (vor allem Fluoreszenzröhren)
6. E-Werkzeug (Bohrmaschine, Rasenmäher usw.)
7. Spiel- und Freizeitgeräte (Modelleisenbahn, Fitnessmaschine usw.)
8. Medizinische Geräte und Instrumente
9. Überwachungsgeräte
10. Automatische Ausgabesysteme (Fahrkartenautomat usw.)

Relevante Mengen an PGM sind vor allem in den Kategorien 3 und 4 zu erwarten. Die Sammlung der EAG erfolgt in den meisten Mitgliedstaaten aber nicht nach Gerätekategorien, sondern in Sammelgruppen, in denen Geräte, die ähnlich zusammengesetzt sind und somit gleiche Entsorgungswege gehen, zusammengefasst werden: Großgeräte, Kühlgeräte, Kleingeräte, Bildschirme (die in Deutschland mit IKT und UE zusammen erfasst werden) und Lampen.

Das zukünftige Gesamtaufkommen an Elektronikschrott in der EU wird auf 20kg pro Kopf geschätzt, davon entfallen 12kg auf Konsumenten, 5kg auf die Industrie und etwa 3kg auf Kabel aus Infrastrukturen. Die Vorgabe der EU, 4 kg WEEE pro Einwohner und Jahr zu sammeln, wird in den EU15 teilweise deutlich übertroffen⁴⁷, in den EU10 noch nicht überall erfüllt. Dort steigt die Menge allerdings schnell, auch weil große Elektrogeräte in großen Mengen aus den alten Mitgliedsstaaten importiert werden und dort als WEEE anfallen. Bei den Kleingeräten ergeben sich erhebliche Unterschiede auch zwischen den EU15-Staaten, was auf große verbleibende Potenziale schließen lässt.

Insgesamt hat die WEEE-Richtlinie relativ große Interpretationsspielräume offen gelassen, so dass eine Vielzahl verschiedener nationaler Elektronikschrott-Verordnungen innerhalb der EU existieren (vgl. UNU 2008, 243), was im Binnenmarkt zu administrativen Kosten (z.B. durch national unterschiedliche Vorschriften bei der Herstellerregistrierung) für die hochwertige Wiederverwendung oder Verwertung der Abfallströme führt.

Revision der WEEE-Richtlinie

Eine von der EU-Kommission beauftragte Überprüfung der WEEE-Richtlinie hat ergeben, dass sie nicht nur „nicht die geplante Wirkung erzielt hat und ihre Ziele nicht effizient genug verwirklicht werden, sondern dass auch unnötige Kosten anfallen“ (EU 2008, 2). Auf dieser Grundlage hat die Europäische Kommission im Dezember 2008

⁴⁷ Das 4kg-Ziel der Richtlinie wird kritisiert, weil es für die EU15 keinerlei Anreize bietet, die bestehenden Sammelsysteme auszubauen, vgl. UNU 2008.

einen Vorschlag zur Änderung der WEEE-Richtlinie entwickelt. Dort ist u.a. auch vorgesehen, die Sammelquote in Zukunft auf 65% der in den beiden Vorjahren in Verkehr gebrachten EEE zu erhöhen (vgl. Rummler 2009, 6). Dies würde in vielen Mitgliedstaaten eine erhebliche Steigerung der zu sammelnden Mengen bedeuten. Würde in diesem Rahmen die Sammlung von Altgeräten der IKT und UE gesteigert, würde das Potenzial für das PGM-Recycling steigen.

4.3.3 ElektroG

Das Elektro- und Elektronikgerätegesetz dient u.a. der Umsetzung der WEEE-Richtlinie in deutsches Recht. Es trat am 16. März 2005 in Kraft.

Sämtliche Hersteller von Elektro- und Elektronikgeräten im Sinne des Gesetzes müssen sich bei der zuständigen Behörde registrieren lassen (ca. 8300 in 2008) und ihre in Verkehr gebrachten Mengen nach Gerätekategorie melden.

Für die Sammlung der Altgeräte aus privaten Haushalten ist auch weiterhin die kommunale Abfallwirtschaft zuständig (entweder im Bring- oder Holsystem), für die Haushalte ist die Abgabe unentgeltlich. Die Aufwendungen für die Sammlung dürfen die Kommunen über Abfallgebühren refinanzieren. Die Kommunen stellen die gesammelten Altgeräte sortiert in fünf Sammelgruppen zur Abholung durch die Hersteller bereit (PGM-relevant ist dabei vor allem die Sammelgruppe 3 - Informations- und Telekommunikationsgeräte, Geräte der Unterhaltungselektronik). Die anschließende Wiederverwendung oder Behandlung haben die Hersteller selbst zu organisieren (vgl. BMU 2005, 1ff.).

§12 des ElektroG definiert die Verwertungsquoten gemäß den Vorgaben der WEEE-Richtlinie für die unterschiedlichen Gerätekategorien. Dabei wird unterschieden zwischen der Verwertung, die sowohl die stoffliche als auch die energetische Verwertung umfasst, und der Wiederverwendung und stofflichen Verwertung von Bauteilen. Die nachfolgende Tabelle zeigt die Quoten für die fünf Sammelgruppen, die sich jeweils auf das durchschnittliche Gewicht eines Gerätes beziehen.

Tab. 29: Vorgegebene Verwertungsquoten im ElektroG

Gruppe	Gerätetypen	Verwertung in %	Davon Wiederverwendung und stoffliche Verwertung von Bautei- len, Werkstoffen und Stoffen in %
1	Haushaltsgroßgeräte, automatische Ausgabeautomaten	80	75
2	Kühlgeräte	80	75
3	IT- und TK-Geräte, Unterhaltungs- elektronik	75	65
4	Gasentladungslampen	80	80

5	Haushaltskleingeräte, Beleuchtungskörper, Werkzeuge, Spielzeuge, Sportgeräte, Medizingeräte, Überwachungs – u. Kontrollgeräte	70	50
---	---	----	----

Quelle: BMU 2008

Entsorgungssysteme

Vor der Umsetzung der WEEE-Richtlinie durch das ElektroG wurde die Entsorgung von Elektroaltgeräten zumeist von mittelständischen Unternehmen durchgeführt, die lokal agierten. Viele dieser Firmen sind aber nicht in der Lage, wie gefordert deutschlandweit die Abholung von Containern zu garantieren. Dies hat zu einer Entwicklung von Entsorgungssystemen geführt, die den Herstellern die Verwaltung und Organisation der flächendeckenden Rücknahme anbieten. Von diesen gibt es in Deutschland ca. zwanzig, die alle deutschlandweite Netzwerke mit Transport- und Entsorgungsunternehmen aufgebaut haben, um die etwa 1.600 kommunalen Sammelstellen abzudecken. Viele dieser Systeme agieren auch europaweit.

Die geteilte Verantwortung zwischen Kommune (Sammlung) und Herstellern (Entsorgung) hat zu gesunkenen Standards in der für eine hochwertige Wiederverwendung sowohl der ganzen Geräte als auch einzelner Stoffgruppen notwendigen Getrenntführung der Produkte geführt. Nach der Sammlung in den fünf Sammelgruppen in großen Containern, dem Transport und Abschütten des gesamten Inhalts beim Erstbehandler besteht kaum noch eine Möglichkeit, einzelne Produkte auf ihre Funktionstüchtigkeit zu testen. Dazu kommen die im europäischen Vergleich sehr niedrigen Entsorgungspreise, die von den Herstellern ausgehandelt werden: „So liegen beispielsweise in Österreich die Verwertungskosten für ein Kühlgerät mit 13,20 Euro um mehr als siebzig Prozent höher als hierzulande (7,70 Euro). Die Bildschirmverwertung kostet in der Alpenrepublik sogar mehr als das 4,5-fache als in Deutschland“ (Leonhardt 2007, 9). Eine Wiederverwendung von Geräten findet bisher kaum statt.

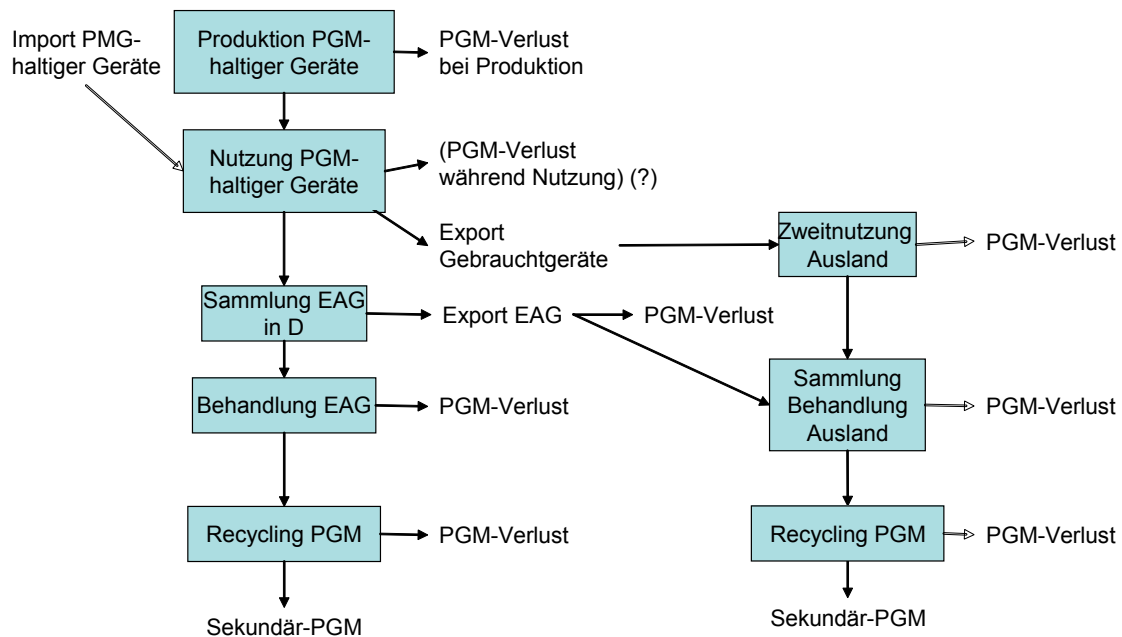
Durch die Zuständigkeit der national agierenden Hersteller für die Aushandlung der Verwertungsaufträge verlieren viele kleine Initiativen an Bedeutung, die in Verbindung mit sozialwirtschaftlichen Einrichtungen stehen, bei denen durch das Recycling Arbeitsplätze für Langzeitarbeitslose oder behinderte Menschen geschaffen werden. Auf der anderen Seite rechnen sich durch diese Skaleneffekte aber auch hochwertige Verfahren mit hohen Fixkosten.

4.4 Identifizierung von PGM- Verlusten

Im Folgenden soll die Kreislaufführung von PGM in Mobiltelefonen und Bildschirmen untersucht werden. Abb. 38 zeigt die unterschiedlichen Untersuchungsschritte: Es wird versucht den gesamten Produktlebenszyklus zu betrachten und nicht nur die Abfallströme, um aus dem Vergleich von Input und Output Rückschlüsse auf die Relevanz einzelner Verlustpunkte zu ermöglichen. Auf Basis dieser Quantifizierungen sollen

dann in Kapitel 5 konkrete Maßnahmevorschläge zur Optimierung der Kreislaufführung entwickelt werden.

Abb. 38: PGM-Ströme in Elektrogeräten, für Deutschland



4.4.1 Beschreibung der Datenlage für PGM in EEE und EAG

Die Datenlage für die Entstehung und den Verbleib von WEEE und Gebrauchtgerten wird übereinstimmend als äußerst unbefriedigend bezeichnet: „There is a lack of information on where WEEE presently ends up and the environmental fate of the waste streams. The extensive uncontrolled and unrecorded transboundary movements of these end-of-life goods or their components make tracking of WEEE and its final disposal routes difficult.“ (EEA 2003, 9). Die Situation hat sich vor allem in Europa in den letzten Jahren deutlich verbessert, trotzdem bestehen nach wie vor erhebliche Unsicherheiten.

Mit der 2010 veröffentlichten Dissertation von Perrine Chancerel „Substance flow analysis of the recycling of small waste electrical and electronic equipment“ liegt nun erstmals eine konsistente Beschreibung der Stoffflüsse von PGM in Elektrokleingeräten vor. Danach fielen 2007 insgesamt 653kg Palladium in Elektrokleingeräten als EAG an, davon wurden 385kg separat erfasst, 317kg einer ordnungsgemäßen Erstbehandlung unterzogen und 147kg zurückgewonnen. Insgesamt ergibt sich damit ein Verlust

von 476kg bzw. 72,9% des eingesetzten Palladiums. Tab. 30 zeigt zusätzlich die Ergebnisse für Gold.

Tab. 30: Flows of sWEEE (tonnes) and flows of gold and palladium (kg) associated with sWEEE in Germany, 2007

Country	Input of subsystem	Total flow of sWEEE		Flow of gold		Flow of palladium	
		Flow	Std Dev	Au flow	Std Dev	Pd flow	Std Dev
Germany	Generation	399 602	14 705	2 152	104	653	35
	Collection	309 588	12 363	1 381	69	385	17
	Non-separated collection	90 014	8 728	771	80	268	31
	Reuse	12 974	2 303	97	14	32	5
	Formal treatment	254 854	12 066	1 166	69	317	16
	Informal treatment	41 760	5 638	118	13	35	4
	Recovered	11 677	2 080	512	29	147	9
	Reused	3 722 175	308 278	88	13	29	4
	Discarded	1 115 258	70 213	1 552	90	476	33

Quelle: Chancereel 2010

Die Arbeit basiert auf einer Vielzahl empirischer Untersuchungen, die erstmals verlässliche Daten für verschiedene der in Tab. 30 gezeigten Stufen der Stoffflüsse ermöglichen. Allerdings weist die Studie methodisch einen etwas anderen Systemgrenzen und vor allem einen anderen räumlichen Zuschnitt auf als die hier gewählte Forschungsfrage, so dass die Ergebnisse nicht 1:1 übernommen werden können. Unterschiede ergeben sich vor allem durch die zusätzliche Betrachtung der Exporte von Gebrauchsgütern, so bezieht sich z.B. die hier verwendete Nutzungsdauer von Geräten nur auf die Nutzung in Deutschland.⁴⁸

Zur Verbesserung der Datenlage verpflichtet die WEEE-Richtlinie die Mitgliedsstaaten, die Mengen an in Verkehr gebrachten und gesammelten elektronischen und elektrischen Geräten (EEEs) statistisch zu erfassen. Für Deutschland sind diese Daten 2006 erstmalig erhoben worden, aggregiert für die 10 Produktkategorien, siehe Tab. 31. Zusätzliche produktspezifische Daten wurden auf EU-Ebene für das „Energy using Products“-Programm erhoben; diese enthalten aber in der Regel keine Daten für die einzelnen Mitgliedsstaaten. Daten zur Ausstattung der Haushalte mit einzelnen EEEs

⁴⁸ Um das WEEE-Aufkommen ohne exakte Daten abzuschätzen, wurden in der Wissenschaft unterschiedliche Methoden entwickelt (vgl. Lohse et al. 1998). Sie gehen von der durchschnittlichen Haushaltsausstattung mit Elektronik-Geräten („consumption and use method“) oder den Verkaufszahlen („market supply method“) aus. Während die erste Methode vor allem von Schätzungen über die Lebensdauer abhängig ist, ist bei der zweiten Methode die Marktsättigung entscheidend, d.h. ob durch den Verkauf ein bereits angeschafftes Gerät ersetzt wird oder nicht.

werden von den statistischen Ämtern erhoben. Darüber hinaus wurde für die weiteren Analysen auf Angaben der Hersteller und ihrer Verbände zurückgegriffen.

4.4.1.1 EAG- Mengen in Deutschland

Insgesamt wurden im Jahr 2006 rund 750 000 Tonnen Altgeräte aus privaten Haushalten und aus dem Gewerbe erfasst. Die pro Kopf-Erfassungsmenge ausgedienter Elektroaltgeräten aus privaten Haushalten liegt damit in Deutschland bei über acht Kilogramm pro Einwohner. Davon entfielen über 60% auf den Bereich der Haushaltsgroßgeräte, die an der Menge der in Verkehr gebrachten Geräte aber nur etwa 39% ausmachen. Da im Jahr 2006 rund 1,8 Millionen Tonnen neue Elektro- und Elektronikgeräte in Verkehr gebracht wurden, ist für die Zukunft mit einem weiteren Anstieg der Erfassungsmenge von Altgeräten zu rechnen (vgl. BMU 2008). Gemäß § 13 ElektroG ist jeder Hersteller verpflichtet, der ear zu melden, welche Mengen er in den Markt gebracht hat, und welche Mengen er entsorgt hat. Für die entsorgten Mengen muss berichtet werden, welcher Anteil energetisch und welcher Anteil stofflich verwertet wurde.

Für den Bereich IKT und UE (Kategorien 3 und 4) zeigt Tab. 31, dass hier die Erfassungsquote bei nur knapp einem Drittel der in Verkehr gebrachten Menge liegt. Dafür ist die Quote für die Wiederverwendung kompletter Geräte für die Kategorie IKT mit deutlichem Abstand am höchsten, hierbei handelt es sich überwiegend um Mengen aus der Eigenrücknahme von Herstellern aus gewerblichen Quellen. Von den Neuge-räten machen PCs etwa 32%, Druckgeräte etwa 30,2 %, Monitore 28% und Handys etwa 2% aus⁴⁹ (Chancerel/ Rotter 2008, 81).

⁴⁹ Angaben beziehen sich auf das Jahr 2002.

Tab. 31: In Verkehr gebrachte, gesammelte und verwertete Mengen an Elektro- bzw. Elektroaltgeräten in Deutschland im Jahr 2006 in t

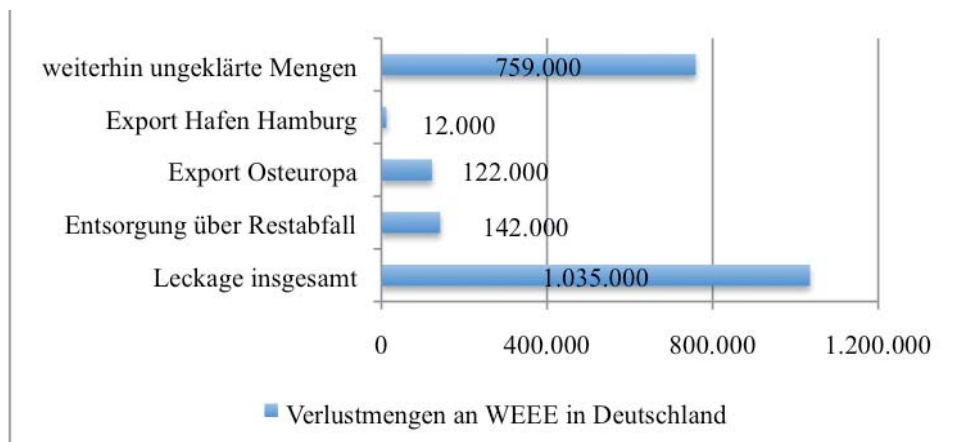
Produktkategorie	In Verkehr gebrachte Mengen	Gesammelte Mengen			Behandelte Mengen		Wiederverwendung ganzer Geräte
		private Haushalte	andere Quellen als private Haushalte	Gesamt	Verwertungsquote	Recyclingquote	
Haushaltsgroßgeräte	723.547	447.393	14.673	462.066	91%	84,00	3.141
Haushaltskleingeräte	144.877	41.621	1.206	42.827	91,6%	67,20	651
IT- und Telekommunikationsgeräte	314.896	86.573	15.762	102.335	95,3%	77,80	5.179
Geräte der Unterhaltungselektronik	334.018	108.149	4.607	112.756	94,9%	77,60	786
Beleuchtungskörper	90.969	-	375	375	100%	88,20	113
Gasentladungslampen	25.556	5.551	-	5.551	95,7%	95,40	0
Elektrische und elektronische Werkzeuge	118.695	10.683	899	11.582	84%	69,90	132
Spielzeug sowie Sport- und Freizeitgeräte	25.172	2.534	2.062	4.596	82,7%	69,50	37
Medizinische Geräte	25.711	741	2.932	3.673	95,1%	81,90	593
Überwachungs- und Kontrollinstrumente	18.497	948	231	1.179	69,1%	58,90	220
Automatische Ausgabegeräte	14.972	5.592	1.366	6.958	94,4%	64,00	1.126
Summe	1.836.913	709.787	44.113	753.900	92,1%	80,90	11.978

Quelle: BMU 2008

4.4.1.2 Erfassungslücken

Die Mengen an gebrauchten EEE und EAG, die am System des ElektroG vorbeigehen, werden für das Jahr 2007 auf über 1 Mio. t geschätzt (vgl. Rhein 2009, 70). Bei einer Gesamtmenge von etwa 1,8 Mio t in Verkehr gebrachten EEE entspricht das etwa 65%. Damit ergibt sich für Deutschland folgendes Bild, wobei die Ergebnisse von Sander/ Schilling (2010) darauf hinweisen, dass die Mengen, die über den Hafen Hamburg gehen doch deutlich höher liegen als die hier angegebenen 12.000t:

Abb. 39: Verlustmengen EEE und EAG in 2007 in t



Quelle: Rhein 2009

Zu diesen Mengen trägt auch die steigende Anzahl von Kommunen bei, die nach §9 ElektroG für eine bestimmte Sammelgruppe für mindestens ein Jahr „optiert“ und diese selber verwertet oder verwerten lässt, dabei ergeben sich offenbar Lücken in der Datenerfassung (es handelt sich dabei nicht nur um Erfassungs- sondern auch um Meldedefizite, vgl. Prein 2009, 69). Hierzu berichten Marktteilnehmer, dass es vor allem bei der Sammelgruppe 3 (IKT und UE) immer wieder zu Überlassungen an Dritte in größeren Mengen kommt, quantifizierbare Angaben liegen hierzu allerdings nicht vor (vgl. Sander/ Schilling 2010).

4.4.1.3 Datenlage für Exporte

Schwierig ist die Datenlage vor allem im Hinblick auf exportierte gebrauchte Elektrogeräte. (Sander/Schilling 2010) ermittelten eine Spannweite von 93.000 bis 216.000 t Elektrogeräten, die über den Hamburger Hafen 2008 exportiert wurden.

Güter, die aus Deutschland in Länder außerhalb der Europäischen Union exportiert werden, müssen dem Zoll gemeldet werden, der diese nach dem international gültigen „Harmonisierten System zur Bezeichnung und Codierung von Waren“ (HS) erfasst und um zwei weitere Ziffern ergänzt („Kombinierte Nomenklatur“), die innerhalb der EU eine genauere Zuordnung in Produktgruppen ermöglicht. Die Exportstatistik weist für die Analyse von Exportströmen bei Elektrogeräten zwei grundsätzliche Mängel auf:

1. Zum einen unterscheidet sie – anders als bei PKW – nicht zwischen Neu- und Gebrauchtwaren. Eine annäherungsweise Zuordnung ist anhand des Verhältnisses von Gewicht und Wert möglich.
2. Zum anderen müssen Waren, die weniger als 1.000kg pro Anmeldung wiegen und einen Wert von weniger als 1.000 Euro aufweisen, nur mündlich beim Zollamt angemeldet werden und werden somit nicht in der Exportstatistik erfasst.

In einem aktuellen UBA-Forschungsprojekt wurde daher auf Angaben aus dem „Zollausfuhrüberwachung im Paperless Port – ZAPP“-System zurückgegriffen, das im Hamburger Hafen auch Exporte unterhalb der Erfassungsgrenze von 1.000 Euro registriert. Das ZAPP-System erlaubt über die Beschreibung der Produkte auch eine Unterscheidung in Gebraucht- und Neuwaren. Danach handelte es sich bei 64% der angemeldeten Waren um gebrauchte Güter, in Bezug auf die reine Masse sogar bei 89% der Waren (vgl. Sander/ Schilling 2009, 24).

4.4.2 Handys

Wie kaum ein anderes Produkt steht das Handy für den steigenden Einfluss der Informations- und Kommunikationstechnologien. Durch seine fortschreitende Funktionserweiterung steht es quasi im Zentrum der „digital wave“ (vgl. Reller et al. 2009). Es verdeutlicht aber auch die intrinsischen Risiken der Rohstoff-Abhängigkeit im IKT-Bereich: Für Indium, das in den Displays eingesetzt wird, und das in den Akkus enthaltene Lithium sind bisher noch keine adäquaten Substitute in Sicht, obwohl die statische Reichweite in beiden Fällen zumindest für Indium weniger als 20 Jahre beträgt. Reller et al. warnen davor, dass der Ausfall nur eines dieser Metalle zu Produktionsunterbrechungen und letzten Endes zu einem „ökonomischen Kollaps“ (vgl. ebd., 134) führen könnte. Die Materialzusammensetzung von Mobiltelefonen variiert je nach Modell und Hersteller teilweise deutlich, die Menge an PGM pro Handy wird von Hagelüken (2009) jedoch seit Jahren konstant mit 9mg angegeben.

4.4.2.1 PGM pro Mobiltelefon

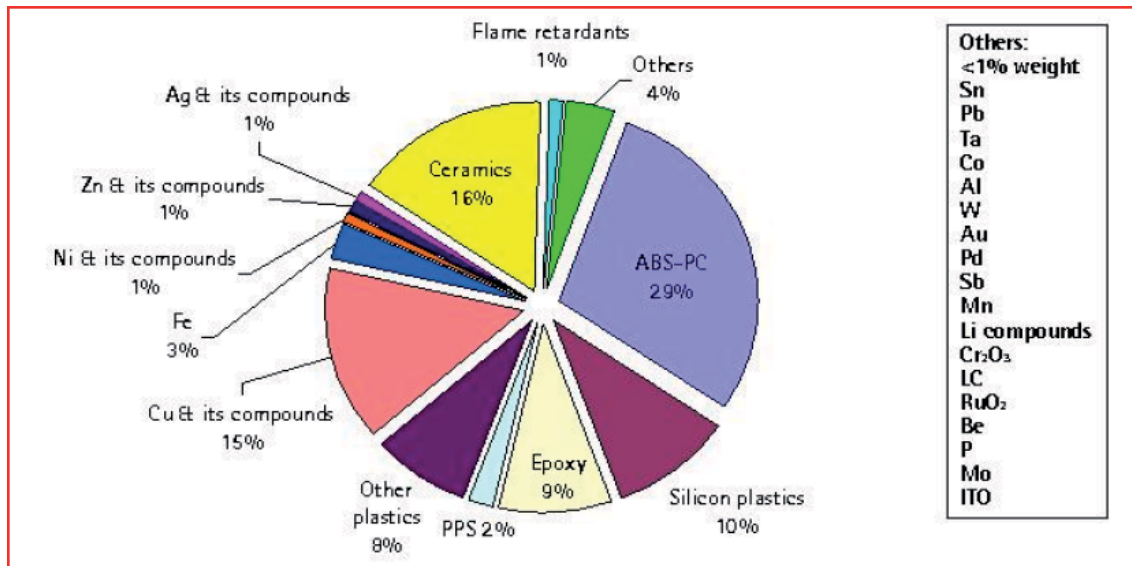
Über den Lebenszyklus verteilt ist die Produktionsphase für etwa 60% des Gesamtenergieverbrauchs eines Handys verantwortlich, davon entfallen wiederum etwa 40% auf die Produktion der PGM enthaltenden Leiterplatten (vgl. Singhal 2005, 39). Bei aktuellen Handys verschieben sich die Zahlen etwas in Richtung der Nutzungsphase, da die Handys mittlerweile leichter sind als noch vor fünf Jahren und damit vor allem für die Verschalung weniger Rohstoffe beanspruchen.

In der Ökobilanzierung eines Handys spielen Platin und Palladium in Bezug auf den Indikator Gesundheitsgefährdung eine zentrale Rolle (zusammen etwa 60%), da bei ihrer Produktion zumindest in Russland erhebliche Mengen an SO₂ emittiert werden (vgl. Althaus et al., 2003).

Rohstoffe in Handys

Handys sind in ihrer Struktur und Zusammensetzung äußerst komplexe Produkte. Ein durchschnittliches Handy enthält etwa 1.000 Einzelkomponenten, die insgesamt mehr als die Hälfte der chemischen Elemente im Periodensystem enthalten (vgl. Nokia 2005, 7), siehe Abb. 40.

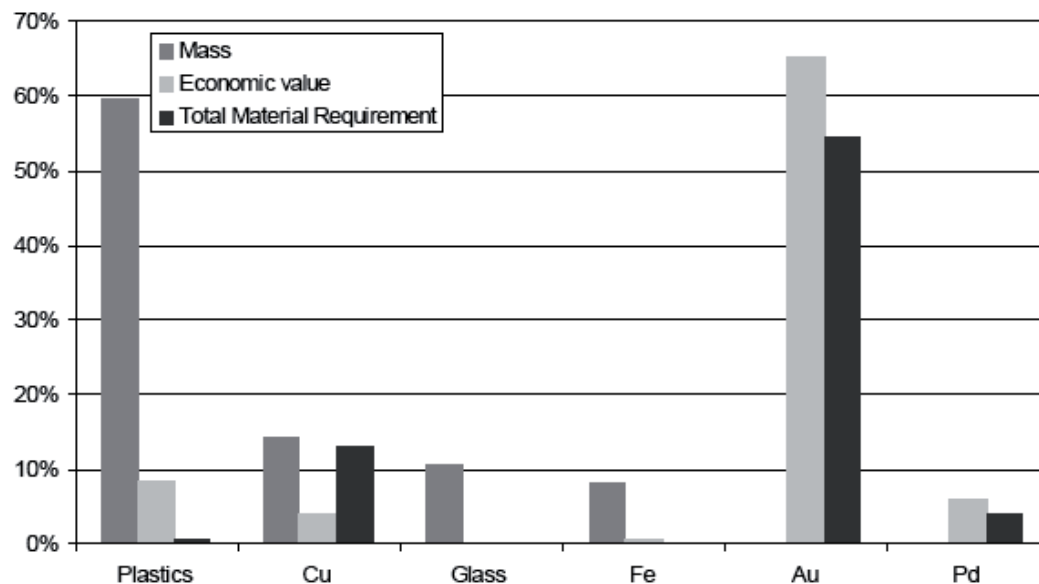
Abb. 40: Stoffliche Zusammensetzung eines Handys 2005



Quelle: Nokia 2005

Die ökologische Relevanz der enthaltenen Stoffe unterscheidet sich allerdings deutlich von der in Abb. 40 gezeigten Gewichtsverteilung, besonders bei den enthaltenen Edelmetallen.

Abb. 41: Anteile an Masse, Wert und TMR verschiedener Stofffraktionen im Handy



Quelle: Chancere/ Rotter 2009

Palladium in Handys

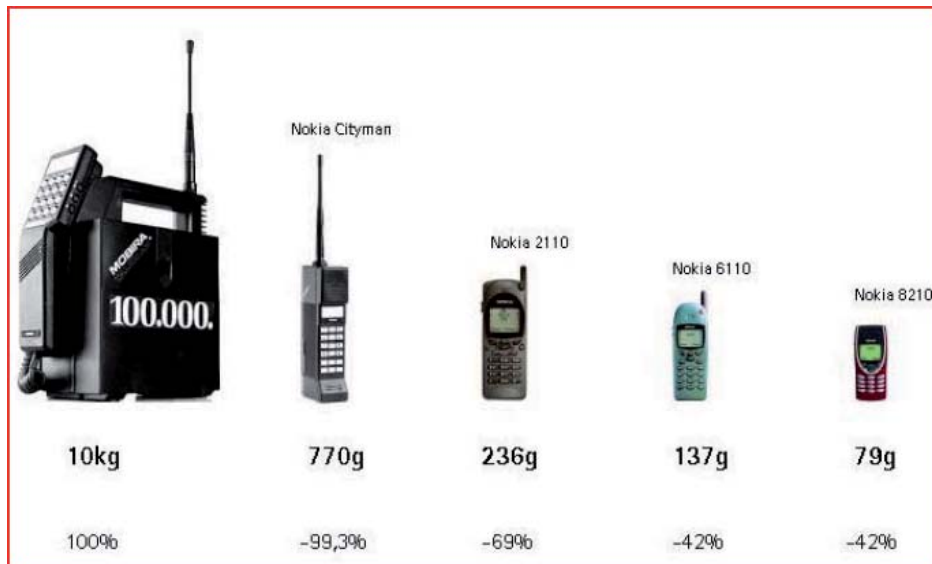
Die Materialzusammensetzung von Mobiltelefonen variiert je nach Modell und Hersteller teilweise deutlich, die Menge an PGM pro Handy wird von Hagelücken (2009) jedoch seit Jahren konstant mit 9mg angegeben. Die konstante Menge erscheint aus zwei gegenläufigen Effekten plausibel: Einerseits sinkt die Einsatzmenge an PGM pro MLCC auf den Leiterplatten und die Handys werden auch insgesamt immer kleiner (Abb. 42). Tab. 32 zeigt eine Übersicht zu Literaturangaben zum Gehalt von Palladium und anderen Edelmetallen in Mobilfunktelefonen:

Tab. 32: Materialzusammensetzung von Mobilfunktelefonen, g/kg

Material/ Quelle	Huisman 2004	Sullivan 2006	Hagelücken/ Buchert 2008	Chancerel et al. 2009
Cu	116	142	113	
Ag	1,42	3,1	3,13	1,22
Au	0,33	0,3	0,3	0,22
Pd	0,12	0,13	0,11	0,06

Quelle: Beigl et al. 2010

Abb. 42: Entwicklung des Handys seit 1980



Quelle: Nokia 2005

Andererseits werden Handys auch immer komplexer und vereinen mittlerweile ganz unterschiedliche Funktionen in einem Gerät. Dazu gehören z.B. integrierte Kameras, MP3-Player und zunehmend auch internetbasierte Funktionen, die zu einer höheren Anzahl von MLCCs auf den Platinen führen.

Exkurs Tantal und Indium in Handys

Neben Palladium sind hier vor allem das in den LCD-Displays enthaltene Indium (s. Kap. 4.2) und vor allem das aus Coltan-Erz gewonnene Tantal zu nennen. In Handys wird Tantal als Barium-Zink-Tantal-Oxid verwendet, das sich durch besondere Eigenschaften auszeichnet, um als Resonator im Handy verwendet zu werden. Ein überzeugendes Substitut für Tantal wurde bisher trotz intensiver Forschungsanstrengungen nicht gefunden (vgl. Committee on Critical Mineral Impacts of the U.S. Economy 2008). Pro Handy werden etwa 0,3g Tantal verwendet.

Tantal gehört zu den Metallen, die auch in der integrierten Anlage von UMICORE nicht aus EAG zurück gewonnen werden können. Der Abbau von Coltan, aus dem Tantal gewonnen wird, steht im besonderen Fokus, weil sein illegaler Abbau den Bürgerkrieg im Kongo unterstützt und dort gleichzeitig eines der letzten großen Reservate für Gorillas gefährdet.

4.4.2.2 Marktdaten: Verkauf, Bestand, Nutzung von Mobiltelefonen

Der weltweite Bestand an Handys hat im Jahr 2006 die Grenze von 2 Mrd. Stück überschritten (Singhal 2005, 8). Insgesamt wurden zwischen 1997 und 2008 weltweit etwa 7,2 Mrd. Handys verkauft (bei einem durchschnittlichen Verkaufspreis von 161 US-Dollar), so dass schätzungsweise 3 Mrd. Handys mittlerweile die End of Life-Phase erreicht haben (vgl. Hagelüken 2009, 11). Weltweit werden jährlich ca. 1,2 Mrd. neue Handys verkauft.

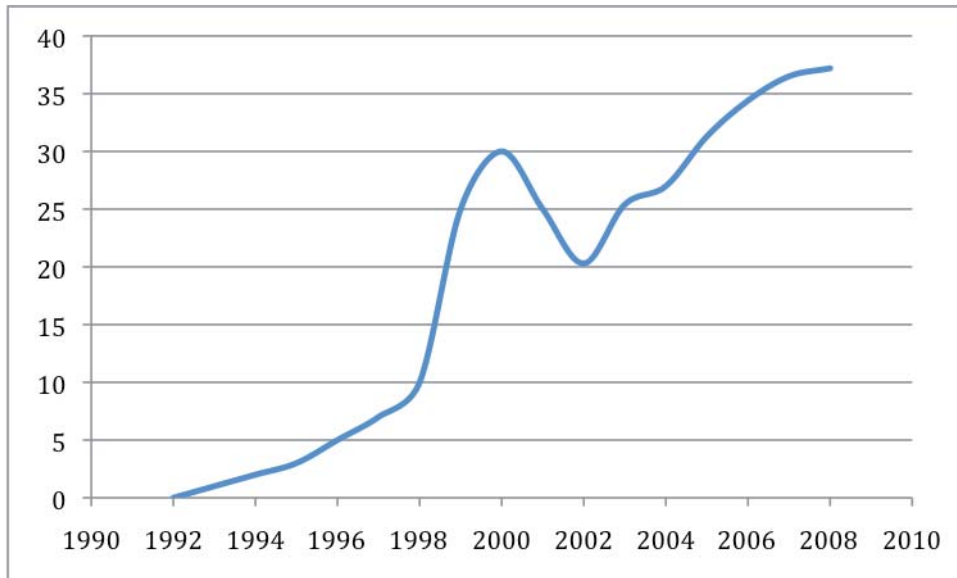
Die durchschnittliche Nutzungsdauer von Mobiltelefonen in Industrieländern beträgt etwa 12-18 Monate, die potentielle Nutzungsdauer beträgt dagegen bis zu 10 Jahre (ebd., 9). Der Bestand an benutzten Handys in der EU25 wurde für 2005 auf etwa 180 Mio. Stück geschätzt, fast in gleicher Höhe bewegen sich mit 160 Mio. die jährlichen Verkaufszahlen, was für das Jahr 2005 einen Anstieg um über 9% bedeutete (UNU 2008, 44). Schätzungen besagen, dass im Jahr 2010 alleine in China etwa 500 Mio. Handys mit 4,5 t PGM in Betrieb sind (vgl. Friedl et al. 2001).

2007 wurden in Deutschland 35 Millionen Handys verkauft, in etwa 80% der Fälle wurde ein altes Handy ersetzt. Die kurze Nutzungsdauer hängt eng mit extrem kurzen Innovationszyklen zusammen. Die Integration von Fotokameras ins Handy oder der UMTS-Standard, der den mobilen Zugriff auf das Internet ermöglicht, führen dazu, dass die Konsumenten sich neue Handys anschaffen, obwohl ihre alten Geräte noch voll funktionstüchtig sind. Ein weiterer entscheidender Faktor ist die gängige Praxis der Mobilfunkanbieter/ Netzbetreiber, den Kauf eines Neugeräts bei Abschluss eines Vertrages deutlich zu subventionieren.

Bis etwa 2005 war auch die zunehmende Miniaturisierung der Geräte ein Motiv, ein funktionierendes Handy trotzdem einzutauschen. Während die ersten Geräte noch ein Gewicht von bis zu 10kg und Anfang der 90er von etwa 0,5 kg aufwiesen, sind die aktuellen Geräte teilweise nur noch 80g schwer (vgl. Abb. 42). Da eine weitere Miniaturisierung zu stark zu Lasten der Bedienungsfreundlichkeit gegangen wäre, ist dieser Trend gestoppt, stattdessen ist ein Trend zu Multifunktionsgeräten zu erkennen, die doch wieder mehr Material und voraussichtlich auch PGM beanspruchen.

Abb. 43 zeigt den Verlauf der Verkaufszahlen für Handys in Deutschland seit Beginn des Mobilfunk-Netzes 1992. Der Boom in den Jahren 1999 und 2000 ist vor allem auf die Einführung der Prepaid-Telefone zurückzuführen. Die aktuellen Rekordzahlen basieren vor allem auf dem Erfolg der sogenannten „smart phones“, die eine Mischung aus Handy und Minicomputer darstellen und beispielsweise den mobilen Zugriff auf E-Mails ermöglichen. Deren Wachstumsraten lagen im Jahr 2007 nach Angaben von Nokia bei 60% (vgl. Wirtschaftswoche 2009). Nach diesen Daten ergibt sich kumuliert über die Jahre eine Menge an verkauften Handys in Deutschland von ca. 320 Mio. Stück. Nach Angaben des Branchenverbands Bitkom haben die Weltwirtschaftskrise sowie eine zunehmende Marktsättigung jedoch zu einem Rückgang der Verkaufszahlen geführt, für das Jahr 2010 wurde ein Verkaufsergebnis von 26,9 Mio. Mobiltelefonen erwartet (vgl. Bitkom 2010)

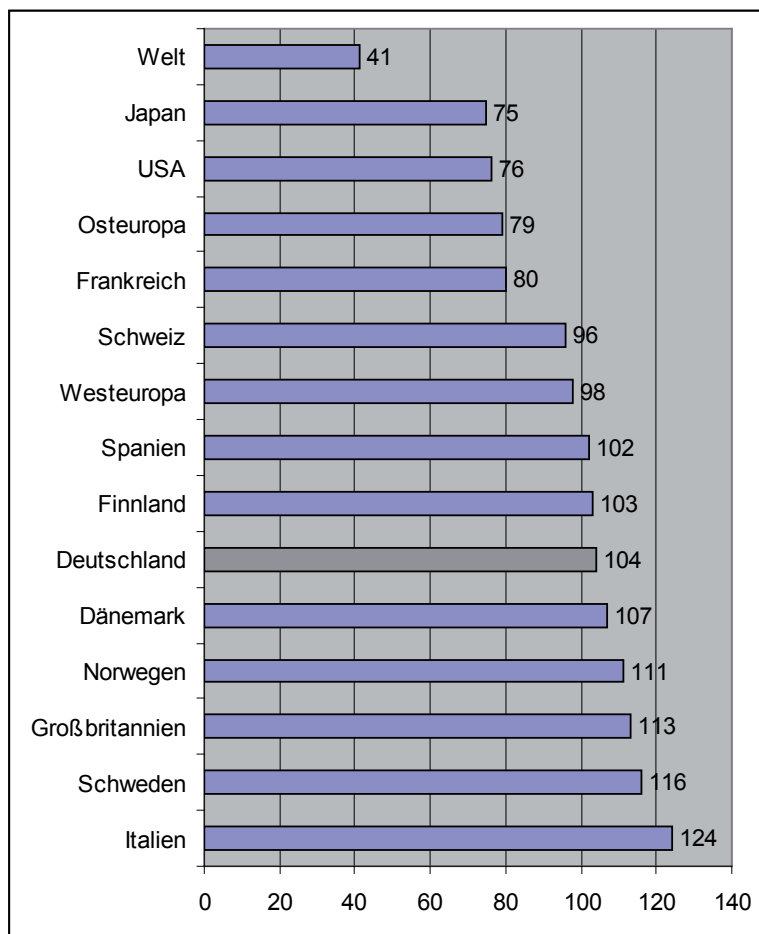
Abb. 43: Entwicklung der Verkaufszahlen für Handys in Deutschland 1992 bis 2008 in Mio. Stück pro Jahr



Quelle: GfK 2009, Bitkom 2009, eigene Berechnungen

Nach Schätzungen des Branchenverbands BITKOM (2007) werden im Jahr 2009 in Deutschland auf 100 Personen etwa 117 Vertrags- und Prepaid-Handys kommen, das entspricht einer Gesamtzahl an in Benutzung befindlichen Handys von knapp 96 Mio. Handys. 2006 lag Deutschland mit 104 Anschlüssen pro 100 Einwohner in Europa noch im oberen Mittelfeld.

Abb. 44: Mobiltelefone je 100 Einwohner 2006 in verschiedenen Ländern



Quelle: Bitkom 2007

4.4.2.3 Akteure des Mobiltelefonmarktes

Akteure

Die Akteurskonstellation auf dem Handymarkt ist durch die Besonderheit gekennzeichnet, dass die Netzbetreiber den Verkauf von Handys stark subventionieren, um die Kunden über Mehrjahres-Verträge an sich zu binden. Mittlerweile hat sich auch ein Markt für Prepaid-Handys entwickelt, aber die Schnittstelle zum Kunden betreuen auch hier nach wie vor hauptsächlich die Netzbetreiber mit einem sehr breiten Netz an Vertriebsstellen. Diese Konstellation, dass neben den Herstellern, die die abfallwirtschaftliche Verantwortung tragen, auch die Netzbetreiber eine starke Rolle im Kundenkontakt und im Vertrieb der Mobiltelefone spielen, beeinflusst die Möglichkeiten zu Rücknahme und Sammlung ausrangierter Mobiltelefone, siehe Abschnitt zu Sammlung und Recycling (Kapitel 4.4.2.5).

Hersteller

Der globale Handymarkt wird seit langem von fünf Herstellern dominiert: Nokia, Samsung, Sony Ericsson, LG und Motorola. Nokia konnte seine Marktführerposition in den letzten Jahren behaupten, allerdings musste das Unternehmen auch mit Einbußen bei den Marktanteilen kämpfen, im ersten Quartal 2009 waren noch knapp 36% aller verkauften Handys weltweit ein Nokia-Modell. Im Gegensatz dazu konnten andere Hersteller ihre Position am Markt verbessern. Allen voran Samsung, die ihren Marktanteil im ersten Quartal 2009 um fünf Prozentpunkte auf 19,1% steigern konnten. Außerdem konnte LG seine Position am Markt festigen und erhöhte seinen Marktanteil auf fast 10%. Die Verlierer in dieser Betrachtung sind Motorola und Sony Ericsson. So wurden am Anfang des Jahres 2008 von Motorola noch rund 30 Mio. Handys verkauft. 2009 konnten nur noch rund 16,5 Mio. Handys verkauft werden und damit sackte der Marktanteil von ursprünglich 10,2% auf 6,2% ab. Ähnlich sieht es für Sony Ericsson aus. Hier wurden knapp 6 Mio. Handys weniger verkauft und der Marktanteil fiel auf 5,4% (vgl. GARTNER, 2009).

Tab. 33: Weltweite Handyverkäufe in Mio. Stück und Marktanteile in Prozent in 2009

	Verkäufe	Marktanteil
Nokia	389,59	36,2 %
Samsung	205,54	19,1 %
LG	106,18	9,9 %
Motorola	66,35	6,2 %
Sony Ericsson	57,88	5,4 %
Rest	250,93	23,4 %
Gesamt	1076,48	

Quelle: GARTNER 2009, eigene Hochrechnungen

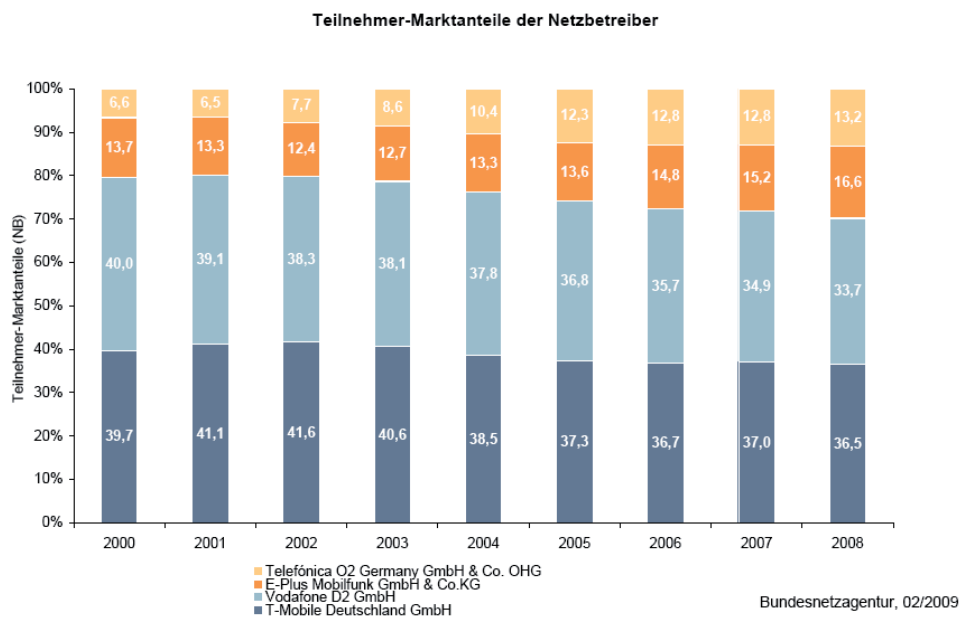
Am deutschen Markt zeichnet sich ein ähnliches Bild ab. Auch hier ist Nokia deutlicher Marktführer, gefolgt von Samsung, Sony Ericsson, LG, sowie Motorola. Auch in Deutschland lässt sich erkennen, dass Nokia immer mehr Marktanteile an seine Konkurrenten abgeben muss und im ersten Quartal 2009 nur noch 34% des Marktes beherrscht. Sony Ericsson liegt mit 25% hinter Nokia auf dem zweiten Platz, Samsung konnte seinen Marktanteil auf 24% erhöhen. Im gleichen Zeitraum konnte LG sich um fünf Prozentpunkte steigern und hält nun 7% des Marktes (vgl. GfK 2009). Weltweit, und besonders in Deutschland, scheint sich der Handymarkt ausdifferenzieren und zukünftig zu einem weniger finnisch dominierten Markt zu entwickeln.

Netzbetreiber

Im Bereich der Handy-Netzbetreiber sind schon seit Jahren die Netze von T-Mobile und Vodafone Marktführer und das auch sehr stabil. Beide Unternehmen bewegen sich zwischen 30-40% an Marktanteilen, wobei ein leichter Trend zu erkennen ist, dass

die kleineren Netzanbieter O2 und E-Plus mehr Marktanteile gewinnen, und die beiden größeren Anbieter dementsprechende Anteile verlieren.

Abb. 45: Teilnehmer-Marktanteile der Handy-Netzbetreiber in Deutschland



Quelle: Bundesnetzagentur 2009

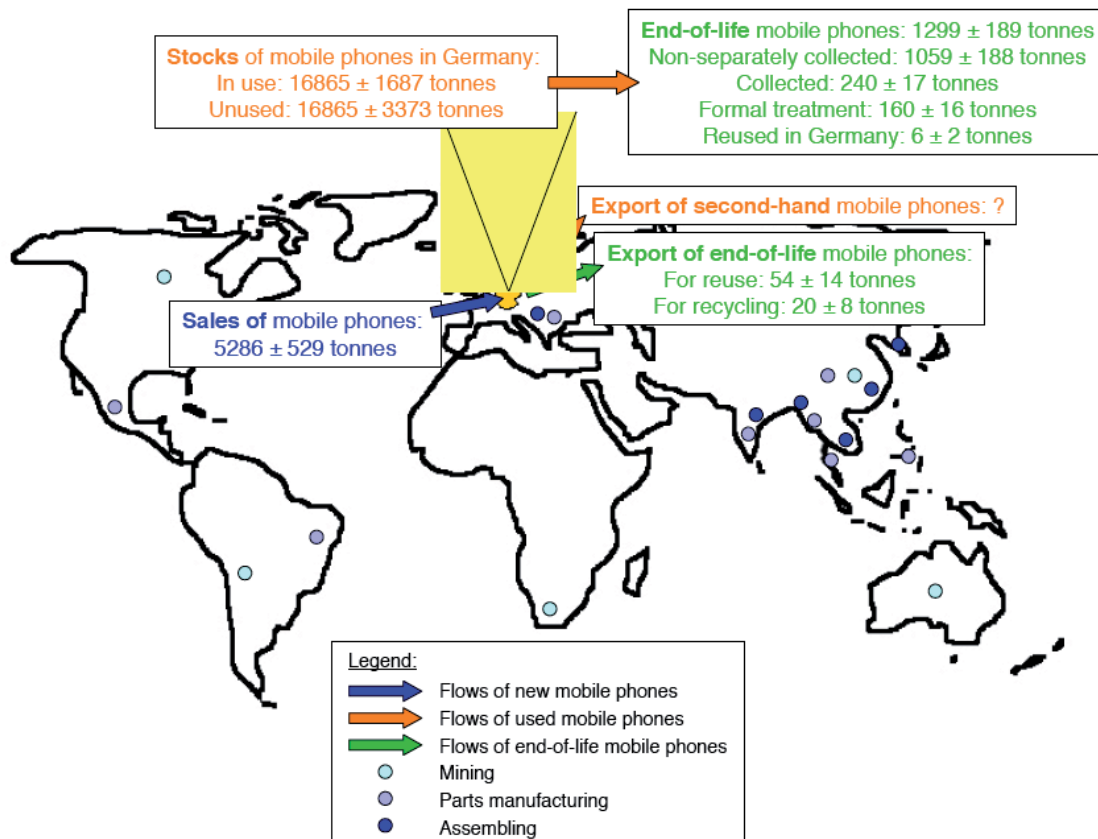
4.4.2.4 Bestand gebrauchter Mobiltelefone: Schatz in der Schublade

Ein relevante, aber nicht genau bekannte Menge an gebrauchten Handys sind noch in den Haushalten vorhanden, werden aber nicht mehr aktiv genutzt. Für Deutschland haben Untersuchungen ergeben, dass in deutschen Haushalten noch etwa 120 Mio. gebrauchte, aber ungenutzte Handys liegen, andere Quellen sprechen von ca. 60 Mio. Altgeräten (vgl. Umweltbriefe 2008, 6). Aktuelle Untersuchungen in der Schweiz haben eine Menge von 8 Mio. Handys bzw. 1,0 pro Einwohner ermittelt, die nicht mehr benutzt werden (vgl. SWICO 2009). Rechnet man diese Zahl auf Deutschland hoch, ergäbe sich eine Menge von etwa 80 Mio. Stück.

Die nachfolgende Abbildung verdeutlicht die Relevanz der Zuwächse im Stock von Handys aus Deutschland, dagegen fielen 2007 nach diesen Berechnungen tatsächlich nicht mehr benutzbare Altgeräte nur in einem wesentlich geringeren Ausmaß an. Scheidt (2007) schätzt, das IKT-Produkte nach ihrer Nutzung in der Regel noch etwa 3 bis 5 Jahre im Haushalt gelagert werden, bevor sie dann doch entsorgt werden. Inso-

fern ist damit zu rechnen, dass die Anzahl an Altgeräten dem Verlauf der Verkäufe mit einem gewissen Zeitverzug folgend stark ansteigen wird.

Abb. 46: Gesamte Stoffflüsse von Handys in Deutschland 2007



Quelle: Chancereel 2009

4.4.2.5 Sammlung, Recycling

Hagelüken (2009) schätzt, dass in Deutschland nur etwa 3% aller Handys nach ihrer Nutzungsphase einem Recycling zugeführt werden. Für die optimale Kreislaufführung sollte das Handy weder in den Hausmüll werfen noch zu lange in der Schublade behalten, da der Re-Use-Wert eines Handys im Zeitverlauf sehr schnell sinkt (MPPI 2009, 8). Die Entsorgung über den Hausmüll tritt allerdings fast nur in den OECD-Ländern auf.

Sammlung

Einer aktuellen Umfrage von Nokia bei 6.500 Kunden in 13 OECD-Ländern zufolge geben nur 3% ihr Handy an eines der unterschiedlichen von Netzbetreibern, Kommunen oder privaten Unternehmen betriebenen Handyrücknahmesysteme, 44% aller verkauften Handys befinden sich noch im Besitz seines Käufers. 75% gaben an, noch nie über diese Möglichkeit nachgedacht zu haben und über die Hälfte hatte überhaupt noch nie von dieser Möglichkeit gehört (vgl. Nokia 2008).

Für die Sammlung von Mobiltelefonen gibt es unterschiedliche Optionen, die nach den Kriterien Sammlung, Finanzierung, und Behandlung unterschieden werden können (vgl. Beigl et al. 2010, 503f.):

- Sammlung: die getrennte Sammlung von Mobilfunkgeräten versus der Sammlung zusammen mit anderen Elektrokleingeräten
- Finanzierung: kollektive Systeme der Hersteller/ Importeure und/ oder Netzbetreiber
- Behandlung: Fokus auf Verwertung oder Wiederverwendung

Je nach Kombination dieser Kriterien können vier prototypische Ansätze der Sammlung von Mobilfunkgeräten unterschieden werden, deren Effizienz angesichts der oben beschriebenen niedrigen Rücklaufquoten einen der zentralen Faktoren für die Kreislaufführung von Palladium in diesen Geräten darstellt:

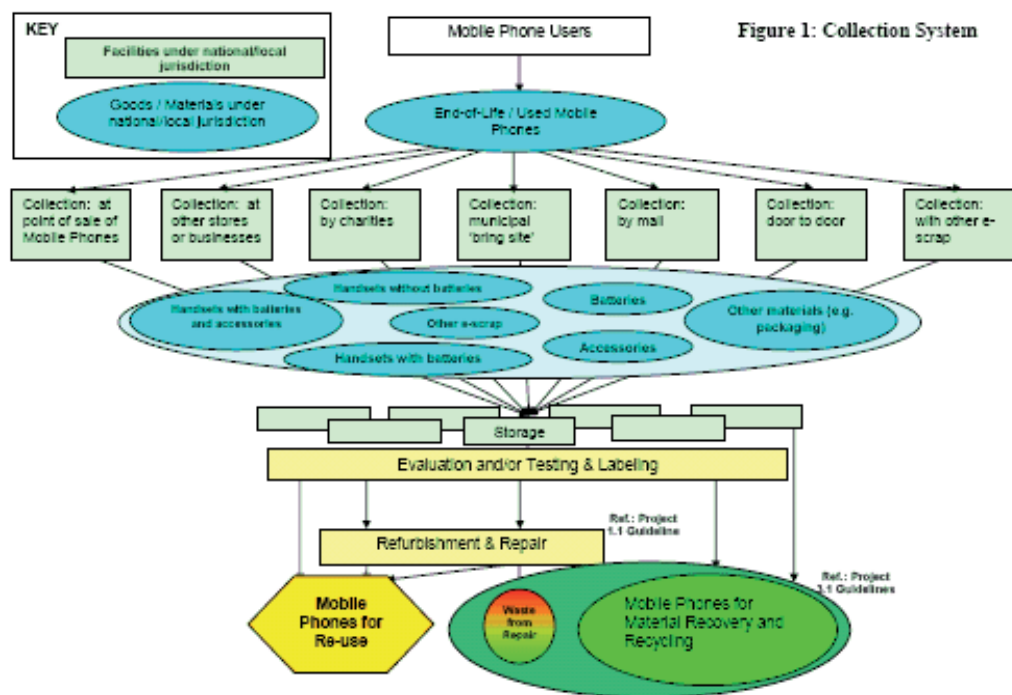
Bei **Rücknahmesystemen** zur Umsetzung der WEEE-RI werden Mobilfunkgeräte in der Regel mit anderen IKT-Geräten zusammen erfasst. Die Mengenvorgaben zur Sammlung bieten dabei wegen des geringen Anteils und Gewichts nur wenig Anreize, die Sammlungsmenge für diese Geräte zu erhöhen. Die Verantwortung für die operative Sammlung liegt in Deutschland wie den meisten anderen EU-Mitgliedsstaaten bei den Kommunen, die finanzielle Verantwortung bei den Herstellern: Sammlung und Behandlung von Mobilfunkgeräten können aufgrund der enthaltenen Edelmetalle nahezu kostendeckend betrieben werden, die Gebührenkalkulation liegt bei etwa 0,03 EUR pro Stück (vgl. SWICO 2009).

Neben diesen durch die WEEE-RI verpflichtenden Systemen gibt es freiwillige **Branchenlösungen**, die wie bisher in Deutschland entweder individuell durch einzelne Hersteller oder Netzbetreiber oder branchenübergreifend organisiert werden können (vgl. hierzu den Maßnahmenvorschlag in Kap. 5.2). Während diese Systeme überwiegend auf die Verwertung abzielen, um ihren eigenen Absatzmarkt nicht zu gefährden, gibt es zusätzlich **kommerzielle Systeme der Wiederverwendung**, die auf eigene Rechnung noch gebrauchsfähige Mobilfunkgeräte erfassen und wieder verkaufen. Die vierte Variante sind **karitative Systeme zur Wiederverwendung**, bei denen bei Abgabe eines noch funktionsfähigen Mobilfunkgeräts eine Spende an bekannte gemeinnützige

Einrichtung geleistet wird – diese Systeme werden in der Regel jedoch operativ von den zuvor genannten kommerziellen Betreibern organisiert (vgl. Beigl 2010, 505).

Abb. 47 zeigt den grundsätzlichen Aufbau dieser Sammelsysteme. Hier lassen sich die unterschiedlichen Ansatzpunkt der beschriebenen Ansätze nachvollziehen.

Abb. 47: Aufbau eines Handy-Sammelsystems



Quelle: MPPI 2009

Unabhängig von der konkreten Ausgestaltung können jedoch drei zentrale Erfolgsfaktoren für die Sammlung ausrangierter Handys identifiziert werden (MPPI 2009, 9):

1. **Bewusstsein des Nutzers:** Er muss über die ökologischen Hintergründe des Handy-recyclings informiert werden.
2. **Aufwand:** Die Sammelpunkte müssen bekannt und gut erreichbar sein.
3. **Anreize:** Da das Handy häufig noch funktioniert, wird ihm ein gewisser Wert beimessen, der durch bestimmte Anreize ausgeglichen werden muss.

Sammlung von Mobiltelefonen in Deutschland

In Deutschland engagiert sich eine Reihe von Initiativen, um gebrauchte Handys zu sammeln. Dabei muss von der Motivation zwischen vier verschiedenen Gruppen unterschieden werden:

1. Handy-Hersteller
2. Netz-Betreiber
3. Professionelle Re-Use Unternehmen
4. Kommunale Wertstoffhöfe, Recyclinghöfe etc.

Zu 1) **Hersteller**: Der Telefonhersteller Nokia unterhält etwa 5.000 Rücknahmestellen bei den Vertreibern und im Handel, die dort abgegebenen Handys werden allerdings nicht weiter genutzt, sondern komplett recycelt. Ähnliches gilt für die anderen Hersteller, wo die Verkaufsshops offiziell auch als Rücknahmestelle fungieren, dies wenn überhaupt nur sehr zurückhaltend kommuniziert wird.

Zu 2) **Netzbetreiber**

Die großen Netzbetreiber sind alle in unterschiedlicher Form bei der Sammlung von Alt- und Gebrauchtgeräten engagiert und bedienen sich dabei unterschiedlicher Kooperationspartner. Die folgenden Darstellungen basieren auf Auswertungen der jeweiligen Online-Kundenportale:

T-Mobile

Laut Angaben der Telekom betrug der Anteil der 2008 zurückgegebenen Handys an der Gesamtzahl aller verkauften Geräte ca. 1 Prozent. Diese geringe Quote erstaunt vor dem Hintergrund, dass Geräte in den Shops von T-Mobile abgegeben werden oder mit speziellen Rücksendeumschlägen kostenlos beim Recyclingpartner eingeschickt werden können. Zudem setzt die Telekom einen zusätzlichen Anreiz, da das Unternehmen pro Handy drei Euro an die Deutsche Umwelthilfe (DUH) spendet. Die Telekom hält die bisherigen Initiativen noch nicht für ausreichend und plant weitere Schritte, unter anderem im Rahmen der im September 2009 gestarteten Nachhaltigkeitsoffensive. Jedoch hat der Konzern ein Modell, das finanzielle Anreize zur Rückgabe setzte, wieder eingestellt, da es vom Kunden nicht akzeptiert wurde. Als Grund hierfür wird „des Deutschen ausgeprägte Sammlermentalität“ und die unzureichende Rentabilität für den Kunden aufgeführt. Der Verkauf eines Handys z.B. bei Onlineauktionsanbietern brächte vergleichsweise höhere Erlöse. Die Telekom hat etwa 64 Prozent der 2008 abgegebenen Altgeräte zum Recycling an die Firma Electrocycling GmbH in Goslar abgeführt, während die restlichen 36 Prozent wiederaufbereitet und als funktionsfähige Geräte an die Firma Teqport GmbH (Asien) weiterverkauft wurden.

Vodafone

Im Bereich Handyrückgabe berichtet Vodafone Deutschland im Vergleich zu den anderen Anbietern mit 160.000 Mobiltelefonen zwar über die höchsten absoluten Rückgabemengen, die aber im Vergleich zur Gesamtzahl der Vodafonekunden ebenfalls sehr niedrig sind. Vodafone kooperiert mit dem Naturschutzbund Deutschland, um die Rückgabe von Handys zu steigern und spendet für jedes zurückgegebene Handy an gemeinnützige Organisationen. Außerdem berichtet Vodafone über ein Online-Verkaufsportal, auf dem jeder Handybesitzer sein nicht mehr benötigtes Handy verkaufen kann, das dann an den Recyclingpartner „Greener Solutions“ übergeben wird. Dieser bereitet die Altgeräte entweder auf und verkauft sie in Schwellen- und Entwicklungsländer oder zerlegt die Geräte für das Recycling.

E-Plus

Im Jahr 2008 hat E-Plus 15.000 Handys eingesammelt, wobei die Abgabequote von Altgeräten durch die Zusammenarbeit mit den Projekten der „Malteser Lebensfreude“ laut E-Plus um den Faktor 2,5 gesteigert werden konnte. Insgesamt wurden die von E-Plus an den Entsorgungspartner „Greener Solutions“ im Jahr 2008 weiter gegebenen 15.000 Altgeräte zu 70 Prozent recycelt, die restlichen 30 Prozent konnten nach Wiederaufbereitung weiterverkauft werden. Eine Verfolgung des Weges von Letzteren ist nach Angaben von E-Plus nicht möglich, hier sei man darauf angewiesen, dass die Firma „Greener Solutions“ ihre Selbstbindung bezüglich sozialer und ökologischer Standards im Umgang mit Gebrauch- und Altgeräten ernst nehme.

Telefónica O2 Germany

Die Rückgabequote von Handys ist bei O2 wie bei den anderen Anbietern sehr gering. O2 ist jedoch das einzige Unternehmen, das sowohl absolute als auch relative Zahlen benennt: Bei 3,6 Millionen verkauften Geräten und 14.923 eingesammelten Altgeräten ergibt sich eine Rückgabequote von 0,41 Prozent. Angesichts dieser geringen Rücklaufquote startete O2 im Oktober 2008 eine Recyclingaktion mit der Aufforderung, alte Handys an den Entsorgungspartner dr.handy zu verschicken. Darüber hinaus soll die Kooperation mit dem WWF weitergeführt werden, bei der O2 2,50 € pro zurückgegebenem Altgerät an Umweltprojekte des WWF spendet. Keine Angaben macht O2 hingegen darüber, wie viel Prozent der zurückgegebenen Geräte nach Wiederaufbereitung weiterverkauft und wie hoch der Anteil derer ist, die entsorgt werden. Der Recyclingpartner der Firma, dr.handy, ist vertraglich an die ethischen und ökologischen Beschaffungsrichtlinien von O2 gebunden.

Zusammenfassung

Die vier großen deutschen Mobilfunkanbieter T-Mobile (36,5% Marktanteil), Vodafone (32,6%), E-Plus (17%) und O2 Germany (13,9%) verfolgen im Bereich des Handyre-

cyclings und der Wiederverwendung prinzipiell die selben Ziele und bedienen sich der selben Methoden. Alle vier Anbieter bieten einen Rücknahmedienst in ihre Geschäftsstellen oder eine Abgabe per Rücksendeumschlag. Die Handys werden gebührenfrei entgegengenommen und entsorgt und zusätzlich wird ein gewisser Betrag einer Wohltätigkeits- oder Umweltorganisation (DUH, Naturschutzbund Deutschland, Malteser, WWF) gespendet. Die funktionsfähigen Handys werden dann aufbereitet und überwiegend in den Länder der dritten Welt als Gebrauchtware verkauft. Irreparable Handys werden von Firmen wie Electrocycling GmbH, Greener Solutions und dr.handy recycelt. Nebenbei bieten einige Anbieter einen Online-Verkauf an, bei dem man für das Handy Geld oder zum Teil auch Payback-Punkte bekommt.

Insgesamt weist die Rücklaufquote bei den Netzbetreibern jedoch noch erhebliche Potenziale auf. Beigl (2010, S. 504) bezeichnet die deutschen Ansätze für flächendeckende Branchenlösungen aufgrund der geringen Sammelmengen daher auch „als im Ansatz gescheitert“. Ein Grund hierfür kann in der für den Verbraucher unübersichtlichen Vielfalt von Systemen gesehen werden.

Zu 3) **Professionelle ReUse-Unternehmen:** Das Unternehmen „Greener Solutions“ als Marktführer hat 2007 in Deutschland 450.000 gebrauchte Handys gesammelt. Dazu wurden unter anderem 22 Mio. Umschläge an deutsche Haushalte verschickt, wobei für jedes eingeschickte Handy (auch gebrauchsunfähige) eine Spende von bis zu 3 Euro an Organisationen wie den WWF gespendet wird. Gleichzeitig bietet das Unternehmen eine Website an, auf der für eine Vielzahl von aktuellen Handytypen Ankaufpreise von bis zu 200 Euro angeboten werden. 80% der noch funktionstüchtigen Handys werden in Entwicklungsländer verkauft. Der weltgrößte Handy-Recycler ReCellular sammelte im Jahr 2007 etwa 4 Millionen Handys ein (vgl. ReCellular 2009). Mittlerweile haben sich am Markt einige professionelle Anbieter etabliert, die über Webportale gebrauchte Handys aufkaufen (vgl. Abb. 48).

Abb. 48: Internetangebote für den Verkauf von gebrauchten Handys

Verkaufen Sie uns Ihr gebrauchtes Handy!

Verkaufen Sie ihr altes Handy mit HandyVerkaufen. Wir bieten schnelle und einfache Online-Abwicklung mit direkter Überweisung auf ihr Bankkonto.

Keine Kosten für Sie, keine Registrierungsgebühr und gratis Versand und Verpackung.

Los geht's! Einfach Hersteller und Handymodell auswählen, erfahren, wieviel Ihr Handy wert ist und verkaufen.

The screenshot shows a web form for selling a used mobile phone. It is divided into three numbered steps:

- Step 1:** A text input field with a green 'Suchen' button. Below the field, it says 'z.B. N95'.
- Step 2:** Two dropdown menus. The first is set to 'Apple' and the second to 'iPhone 8GB'. To the right, a price field shows '€ 109.50' and a green 'Verkaufen' button. To the right of the form is a small image of an iPhone.
- Step 3:** A green button labeled 'Telefon finden'.

Quelle: Website Handyverkaufen

Der Aufkauf gebrauchter Mobilfunkgeräte führt zu einer Nutzungsdauerverlängerung dieser Geräte und senkt damit auch die PGM-Nachfrage. Der Verbleib dieser Geräte am Ende der Nutzungsphase bleibt jedoch häufig unklar, die Angaben einzelner Akteure in Kooperationen mit Netzbetreibern (s.o.) lassen vermuten, dass ein Großteil der noch funktionsfähigen Geräte in Länder exportiert wird, in denen keine Infrastrukturen für die Rückgewinnung der enthaltenen PGM existieren.

Zu 4) **Kommunale Sammlung:** Chancerel und Rotter (2009) gehen auf Basis der Ergebnisse für die Sammelgruppe 3 davon aus, dass 2007 über die kommunale Sammlung bereits ca. 500.000 Handys gesammelt wurden. Die Stiftung elektro-altgeräte-register ear hat Kennzahlen zur gewichtsbezogenen Zusammensetzung der gemischten Sammelgruppen veröffentlicht, die auf einzelne Produktgruppen heruntergebrochen wurden⁵⁰.

⁵⁰ Zusammensetzung gemischter Sammelgruppen, online verfügbar unter: http://www.stiftung-ear.de/aktuell/aktuelle_mitteilungen/kennzahlen/zusammensetzung_gemischter_sammelgruppen, abgerufen am 15.1.2011

Tab. 34: Zusammensetzung gemischter Sammelgruppen in Deutschland

Ergebnisse der Statistischen Analyse im ear-System ab:			24.03. 2006	01.01. 2007	01.01. 2008	01.03. 2009	01.01. 2010	01.01. 2011
Kategorie	Kat. Nr.	Geräteart	Anteil %	Anteil %	Anteil %	Anteil %	Anteil %	Anteil %
Geräte der Informations- und Telekommunikationstechnik	3	Mobil- Telefone	0,10	0,10	0,10	0,41	0,25	0,22

Quelle: EAR 2011

Die gewichtsbezogenen Anteile beziehen sich auf die Sammelgruppe 3 nach dem ElektroG, die die Produktkategorien 3 und 4 nach der WEEE-RI umfasst. Nach der Jahresstatistik-Meldung der ear nach §14 Abs. 7 ElektroG wurden hier über die Systeme der Abholkoordination insgesamt 202.544t Output gesammelt, zusätzlich kommen ca. 25.000t über b2b- und Eigenrücknahme-Systeme. Nimmt man nach Chancerel (2010) ein durchschnittliches Gewicht für Mobiltelefone von 197g an, so ergibt sich eine Anzahl von gesammelten Mobiltelefonen von etwa 2,570.000 Stück, die über die ear-Systeme im Jahr 2009 gesammelt wurden.

Konkrete, wenn auch relativ alte Vergleichs-Daten liegen nur aus Norwegen und der Schweiz vor, wonach sich die spezifischen Sammelmengen zwischen 3,3g (Norwegen) und 4g-10g (Schweiz) pro Einwohner bewegen (vgl. Beigl 2010, 504). Damit läge Deutschland mit dem aktuellen Wert von 6,3g pro Einwohner in etwa in der gleichen Größenordnung. In beiden Ländern gab es im Gegensatz zu Deutschland mit SWICO und El-retur bereits seit längerem nationale Rücknahmesysteme speziell für Mobilfunkgeräte.

Erfahrungen im Ausland

Zur Rücknahme und zum Management von ausrangierten Mobiltelefonen hat es auch in verschiedenen Ländern und Organisationen bereits zahlreiche Vorarbeiten gegeben, auf deren Erfahrungen zurückgegriffen werden kann.

1. Handyrücknahmesystem der Schweiz

In der Schweiz beläuft sich die Rücklaufquote für Handys auf fast 15%. Dort hat der Wirtschaftsverband SWICO 2008 mehrere erfolgreiche Initiativen zum Elektrorecycling durchgeführt, zum Beispiel die Initiative „Wahre Werte“, bei der in 250 Kommunen der Schweiz Sammelcontainer für alte Handys aufgestellt wurden. Außerdem werden in den Schulen der Schweiz Aufklärungsprogramme zum sinnvollen Gebrauch und zum richtigen Recycling von Handys durchgeführt, welche das Recyclingbewusstsein weiter stärken sollen.

2. Mobile Phone Partnership Initiative (MPPI) im Rahmen des Basler Übereinkommens

2002 wurde im Rahmen der Basler Konvention auf Initiative der Schweiz die internationale Mobile Phone Partnership Initiative (MPPI) gegründet. Sie hat sich das umweltfreundliche Management gebrauchter Handys als Ziel gesetzt und umfasst unter Beteiligung von mittlerweile 12 Herstellern und anderen Stakeholdern (Netzbetreiber, öffentliche Einrichtungen, Recycling-Unternehmen, NGOs etc.) vier Arbeitsgruppen: Re-use, collection and transboundary movement, recovery and recycling und awareness raising on design consideration (Basel Convention 2007, 3). Im Rahmen der Initiative wurden eine Reihe von Leitfäden und Pilotprojekten für ausrangierte Handys entwickelt.

Dazu gehört ein Leitfaden für die Sammlung gebrauchter Handys, der eine Übersicht über international erfolgreiche Sammel- und Logistiksysteme sowie Finanzierungsmodelle gibt. Grundlegendes Ziel solcher Systeme ist die Vor- und Aussortierung weggeworfener Mobilfunkgeräte aus den Abfallströmen, die deponiert oder verbrannt werden, und die anschließende Trennung in Geräte, die (evtl. nach Reparatur) noch weiterverwendet werden können oder recycelt werden müssen. Sammelsysteme sind auf die Einbindung einer Vielzahl von Akteuren angewiesen, einer der Schlüssel ist die Akzeptanz der Konsumenten für solche Systeme.

Mobiltelefone im Restabfall

In Stoffstrom-Analysemodell von Chancerel und Rotter (2009) ist die Entsorgung über die Hausmüll-Tonne der mit Abstand wichtigste Entsorgungsweg für alte Handys. Danach sind 2007 über 5 Mio. Handys in den Hausmüll geworfen worden und somit für ein Recycling des enthaltenen PGM aber auch der anderen Edelmetalle verloren gewesen. Untersuchungen aus der Schweiz und Finnland haben ergeben, dass Handys dort nur zwischen 0,06% und 0,12% der gesammelten EAG ausmachen (MPPI 2004). Neuere Zahlen existieren leider nicht, es ist aber davon auszugehen, dass der Anteil in den letzten Jahren gestiegen sein dürfte.

Untersuchungen der TU Dresden haben ergeben, dass auch nach Einführung des ElektroG mit der Pflicht zur Getrennsammlung noch relevante Mengen an kleinen elektrischen und elektronischen Altgeräten (EAGs) mit dem Restabfall entsorgt werden, wodurch hohe Frachtbeiträge an Schwermetallen und halogenierten Substanzen im Restabfall verursacht werden. Stichproben haben zwischen 0,43 und 1,62 kg pro Einwohner und Jahr im ElektroG aufgeführte EAGs im Restabfall gefunden (vgl. Janz/Bilitewski 2007, 325). Allerdings setzen sich diese vor allem aus Haushaltskleingeräten zusammen. IKT- und UE-Geräte spielen mit ca. 5% nur eine untergeordnete Rolle (ebd., 326). Nimmt man wie bei Chancerel/ Rotter einen Anteil von 0,9% Mobiltelefone an den EAGs an, ergäbe sich damit eine Spannbreite von jährlich 1,6 Mio. Handys bis fast 6 Mio. Handys im Restabfall in Deutschland.

Behandlung / Recycling vom Mobiltelefonen

Das Recycling der Metalle im Handy, vor allem auf den Leiterplatten, übersteigt in seinen umweltentlastenden Effekten bei weitem jede andere Fraktion des Handys, auch des Plastiks, obwohl das den mit Abstand gewichtsmäßig größten Anteil am Handy ausmacht (vgl. Huismann 2004).

Separat erfasste Mobilfunkgeräte werden in der Regel händisch demontiert und anschließend stofflich verwertet. Informationen über eine Wiederverwendung einzelner Komponenten liegen nur aus Schweden vor (vgl. Beigl 2010, 504). Nach Angaben von Nokia sind etwa 80% der Materialien eines Handys recyclingfähig (vgl. NOKIA 2008).

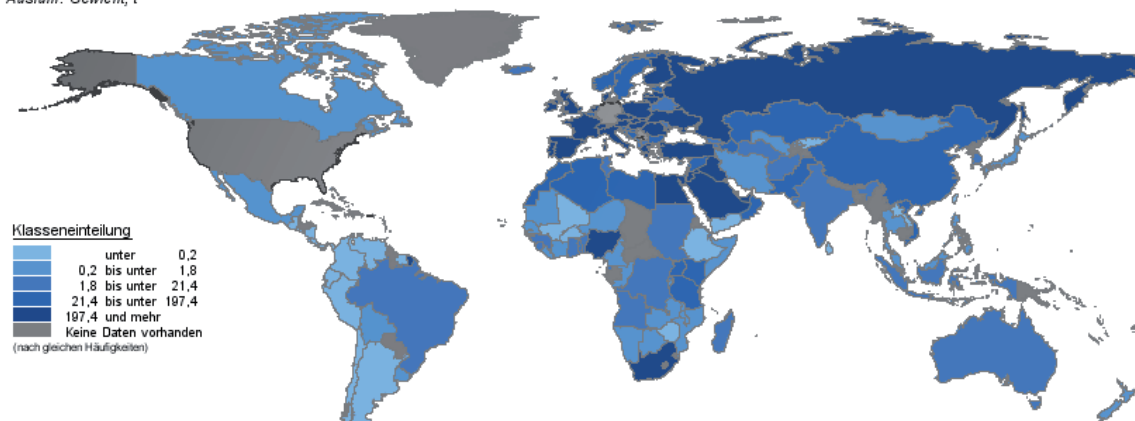
Am Beginn des Verwertungsprozesses steht die Öffnung des Gerätes und die Entnahme der Batterien (NiCad, NiMetHyd oder Lithium-Ion) sowie der PGM-haltigen Leiterplatten. Die Batterien werden separat verwertet, u.a. bei SNAM in Frankreich. Aus diesem Prozess werden u.a. Nickel für die Stahlproduktion, Cadmium und Kobalt für neue Batterien und Kupfer zurück gewonnen. Die Leiterplatten werden wie oben beschrieben weiter behandelt. Anders als beim Autokatalysator spielen PGM-Verluste bei der Demontage der Geräte praktisch keine Rolle.

4.4.2.6 Außenhandel

Die Datenlage für den Export gebrauchter Handys ist aus den unterschiedlichen beschriebenen Gründen (Unterscheidung Neu- vs. Gebrauchtgüter, Wertgrenzen) als sehr schwierig einzuschätzen. Abb. 49 zeigt die globale Verteilung der Exporte von neuen und gebrauchten Handys in 2007 nach der deutschen Außenhandelsstatistik. Danach wurden insgesamt über 57 Mio. Handys exportiert, außerhalb der EU waren Russland und die Vereinigten Arabischen Emirate die Hauptabnehmer (jeweils über 3 Mio. Stück). Die afrikanischen Staaten sind zwar unter den TOP 20 vertreten, in der Statistik mengenmäßig aber nicht so relevant (Südafrika als Hauptabnehmer mit ca. 800.000 Stück).

Abb. 49: Globale Exporte von Handys aus Deutschland in 2007

Ein- u. Ausfuhr (Außenhandel): Deutschland, Jahre,
Warenverzeichnis Außenhandelsstatistik (8-Steller),
Länderverzeichnis für die Außenhandelsstatistik
Außenhandel
2007
Telefon für zelluläre Netzwerke(Mobiltelefone) St
Ausfuhr: Gewicht, t



Quelle: Destatis 2009

Im Vergleich dazu ist die Gesamtmenge seit 2008 dramatisch eingebrochen, die Außenhandelsstatistik weist für 2008 noch 17,8 Mio. Stück aus, für 2009 nur 13,9 Mio.⁵¹. Ein Grund dafür dürfte sein, dass mit der Produktionseinstellung von Motorola in Flensburg Ende 2007 und der Schließung der Nokia-Werke in Bochum Mitte 2008 die letzten großen Produktionsstandorte für Handys in Deutschland geschlossen wurden. Deutschland ist damit von einem Netto-Exporteur zu einem Netto-Importeur geworden: 2008 wurden insgesamt 37 Mio. Handys importiert, was ziemlich genau der Anzahl der verkauften Handys entspricht. Der wichtigste Handelspartner ist dabei China, die über 17 Mio. Stück nach Deutschland geliefert haben.

Der gesunkene Anteil an Neu-Produkten an den Gesamt-Exporten lässt sich neben der gesunkenen Produktion auch am Durchschnittswert der Geräte ablesen, der von 103 auf 87 Euro gesunken ist. Anhand dieser Durchschnitts-Preise lässt sich allerdings auch erkennen, dass es sich bei einem Großteil dieser 17,8 Mio. exportierten Handys um Neuware handeln muss, die nur über Deutschland vertrieben wird. Für Russland als dritt wichtigstem Abnehmer ergibt sich ein Durchschnittspreis von 211 Euro, bei

⁵¹ Ab Berichtsmonat Januar 2009 wurde das Aufbereitungs- und Veröffentlichungssystem der Außenhandelsstatistik modernisiert. Im Rahmen dieser Umstellung sind die Außenhandelsdaten vor Januar 2009 - aufgrund neuer Geheimhaltungsregelungen und neuer Zuschätzverfahren für Meldeausfälle und Warenverkehre unterhalb der Schwellengrenze - nur eingeschränkt vergleichbar. Erfasst sind hier sowohl Geräte, die nur aus Handelszwecken nach Deutschland eingeführt wurden als auch von karitativen Einrichtungen exportierte Geräte.

den wichtigsten Abnehmern Vereinigte Arabische Emirate und Hongkong kann dagegen bei einem Durchschnitts-Preis von 73 Euro bzw. 97 Euro vermutet werden, dass ein relevanter Anteil Gebrauchtgeräte gewesen sein müssen. Die nachfolgende Tabelle zeigt die wichtigsten Export-Ziele außerhalb der EU in 2008 nach der Außenhandelsstatistik, auch hier müssen natürlich die beschriebenen Einschränkungen bei der Aussagekraft der Außenhandelsstatistiken (Schwellenwerte, keine Unterscheidung zwischen Neu- und Gebrauchtgeräten) berücksichtigt werden.

Tab. 35: Exporte von neuen und gebrauchten Handys aus Deutschland außerhalb der EU in 2008

	Ausfuhr: Anzahl	Ausfuhr: Gewicht in t	Ausfuhr: Wert in Tsd. EUR	Durchschnittspreis pro Handy in EUR
Vereinigte Arabische Emirate	2.269.429	902,8	167.524	73
Hongkong	479.313	228,5	46.729	97
Russische Föderation	423.238	195,7	89.314	211
Türkei	419.511	160,3	28.906	68
Schweiz	373.016	184,5	48.577	130
Ukraine	348.161	144,2	58.684	168
USA	227.481	95,6	22.135	97
Singapur	164.085	40,3	7.188	43
Jordanien	154.409	86,4	20.552	133
Südafrika	129.988	70,4	17.175	132
Irak	124.291	69,5	16.606	133
Ägypten	112.083	59,0	10.201	91
Saudi-Arabien	111.528	60,6	14.798	132

Quelle: Deutsche Außenhandelsstatistik 2009

4.4.2.7 Gesamtab schätzung: PGM-Bilanzierung Handys

Global kann geschätzt werden, dass bis zum Jahr 2008 etwa 7,2 Mrd. Handys verkauft wurden, von denen noch etwa 4,2 Mrd. benutzt werden. Das globale Recyclingpotenzial von 3 Mrd. Handys zeigt die folgende Tabelle. Danach sind bisher höchstens 100 Mio. Handys weltweit recycelt worden, ca. 1,4 Mrd. sind wahrscheinlich über den Hausmüll entsorgt worden und stehen damit für ein Recycling nicht mehr zur Verfügung. Schätzungsweise die Hälfte aller Handys sind noch in den Haushalten der Letztbenutzer vorhanden, hier ergibt sich das größte Potenzial für die PGM-Kreislaufführung. Der „Schatz in der Schublade“ enthält etwa 15t Palladium, 373t Silber und über 13.000t Kupfer.

Tab. 36: Kumuliertes, globales Recyclingpotenzial in Handys 1997-2008, in Tonnen

	Verkaufte Einheiten in t	2008 in Nutzung	Recycling- potenzial	in der Schublade	Materialrück- gewinnung	Verlust
Gesamtgewicht	506100	297500	208600	104300	4172	100128
Silber	1808	1063	745	373	15	358
Gold	174	102	72	36	1	34
Palladium	72	43	30	15	1	14
Kupfer	65070	38250	26820	13410	536	12874
Kobalt	27474	16150	11324	5662	226	5436

Quelle: Hagelüken 2009

Die folgende Abschätzung soll einen groben Eindruck des technischen Recyclingpotenzial für PGM aus Mobiltelefonen vermitteln. Alle Angaben sind mit erheblichen Unsicherheiten verbunden und weisen je nach Quelle erhebliche Schwankungen auf:

- Der Input ergibt sich aus den Daten in Kapitel 4.4.3.2, (die verwendeten Werte der GFK liegen dabei deutlich höher als die bspw. von Chancerel 2010 genutzten Angaben der GFU, evtl. sind hier nicht nur privat genutzte Mobiltelefone erfasst)
- Der Wert der nicht mehr genutzten Geräte lässt sich aus den Veränderungen der Ausstattungsrate ableiten, wonach ca. 80% der Geräte ein Altgerät ersetzen. Der Wert erscheint plausibel, da sich bei einer angenommenen Nutzungsdauer von ca. 2 Jahren ein ähnliches theoretisches Abfallaufkommen ergeben würde.
- Die Menge gesammelter Mobiltelefone ergibt sich aus Kapitel 4.4.3.5, wonach über die verschiedenen Sammelsysteme ca. 4 Mio. Geräte erfasst wurden. Es wird angenommen, dass ca. 25% dieser Geräte überwiegend im Ausland weitergenutzt werden (was in etwa der ReUse-Rate von 4% bei Chancerel 2010 entspricht).
- Die Verluste bei der inländischen Behandlung betragen nach Chancerel (2010, S. 81) 39%, da nur 50% der Geräte einer manuellen Demontage unterzogen oder direkt dem metallurgischen Recycling zugeführt werden.
- Die über den Hausmüll entsorgte Menge von ca. 4 Mio. Stück richtet sich nach den Hausmüllanalysen von Chancerel/ Rotter 2009.
- Die Menge der im Haushalt verbleibenden Geräte („hibernating stocks“) stellt die größte Unsicherheit bezüglich der PGM-Stoffflüsse in Mobiltelefonen dar. Es ist aber u.a. aufgrund der stark gestiegenen Sammelmengen über die EARSysteme zu vermuten, dass sich nach dem Aufbau eines Stocks in der Vergangenheit hier Zu- und Abgänge mittlerweile fast die Waage halten.

- Die exportierte Menge von 13 Mio. Stück ergibt sich aus der Auswertung der Außenhandelsstatistik. Dabei soll angenommen werden, dass 80% der Geräte im Anschluss keinem hochwertigen Recycling zugeführt werden.

Tab. 37: Verluste in der Kreislaufführung von PGM in Mobiltelefonen

Quelle: Eigene Berechnungen

Die wichtigsten Verluste in der Kreislaufführung von PGM sind in Tab. 37 rot markiert. Demnach ergäbe sich ein zusätzliches theoretisches Recyclingpotenzial von jährlich etwa 170 kg PGM, wenn tatsächlich ein Rücklauf von 100% erreicht werden könnte und das enthaltene PGM mit einer Recyclingeffizienz von 95% zurückgewonnen würde, die erreicht werden würde, wenn die Geräte dem Recycling zugeführt oder manuell demontiert würden (vgl. Deubzer 2007).

4.4.3 Bildschirme

4.4.3.1 Inputs

Unter dem Oberbegriff „Bildschirme“ verbergen sich unterschiedliche Produkte, die in Bezug auf ihre Post-Konsum-Phase auch mit deutlich unterschiedlichen Problemen behaftet sind. Zunächst muss technisch zwischen herkömmlichen CRT (cathode ray tube, deutsch: Kathodenstrahlröhre)-Geräten, LCD (liquid crystal display)-Bildschirmen und Plasma-Geräten unterschieden werden.

Die CRT-Geräte sind Bildschirme, bei denen Elektronen aus der Kathodenstrahlröhre auf unterschiedlich farbige Pixel gelenkt werden und so ein Bild ergeben. CRT-Geräte waren lange der übliche Bildschirm-Standard, sind auch nach wie vor relativ günstig, allerdings relativ groß und schwer und daher relativ schwer zu handhaben. Außerdem enthalten sie größere Mengen an Schwermetallen (wie z.B. Blei).

Sie wurden daher in vielen Bereichen durch LCD-Bildschirme abgelöst, bei denen die Polarisationsrichtung von Licht durch angelegte elektrische Spannung beeinflusst werden kann. Aktueller Stand der Technik sind Aktiv-Matrix-Displays mit einem Dünnschichttransistor (TFT). Sie sind wesentlich leichter als CRT-Bildschirme und haben eine deutlich niedrigere Einbautiefe.

Eine weitere Alternative zu CRT-Geräten sind Plasmabildschirme, bei denen das verschiedenfarbige Licht durch Leuchtstoffe erzeugt wird, die von einem durch Gasentladungen erzeugten Plasma angeregt werden. Plasmabildschirme wurden vor allem für Großbildschirme eingesetzt, wofür aber mittlerweile auch hochwertige Beamer, LED-Wände und LCD-Bildschirme eingesetzt werden.

Die Elektroaltgeräte-Richtlinie 2002/96/EG unterscheidet nach der Anwendung Bildschirme der Kategorie 3 „Informations- u. Kommunikationstechnologie“ (IKT) und der Kategorie 4 „Unterhaltungselektronik“, bei der Sammlung (in Sammelgruppe 3) wird diese Differenzierung nicht vorgenommen, da in der Behandlung kein Unterschied besteht.

Nach Angaben der EMPA (2005) machen Bildschirme etwa 12% des gesamten Elektronikschrottsaufkommens in Europa aus.

PGM bei der Bildschirmproduktion

Vor allem für die Produktionsanlagen von LCD-Glas werden relevante Mengen an Platin als Ofenauskleidung verwendet, neue Produktionskapazitäten werden vor allem in Südost-Asien geschaffen. Die weltweite Nachfrage nach LCD-Glas ist allein im Jahr 2008 um etwa 25-30 Prozent gestiegen (vgl. Johnson Matthey 2008, S. 42). Bei der Produktion von LCD-Glas treten kaum Platinverluste auf, da es sich um geschlossene industrielle Kreisläufe mit sehr hohen Recyclingraten handelt (vgl. Saurat/ Bringezu 2008).

PGM-Einsatz in Bildschirmen

Bei CRT- und LCD-Geräten wird vor allem Palladium auf den Leiterplatten der Steuerungselektronik verwendet.

Plasma-Bildschirme sind eine der Hauptanwendungsbereiche für Ruthenium, auch wenn die Hersteller wegen der hohen Preise mittlerweile zunehmend auf PGM-Alternativen zurückgreifen (vgl. JOHNSON MATTHEY 2008, 29). Eine aktuelle Untersuchung der United Nations University gibt folgende Mengen Palladium pro Gerät an:

Tab. 38: PGM-Inhalte pro Stück in verschiedenen Bildschirmtypen nach UNU 2008

Bildschirm-Typ	Palladium-Inhalt
CRT Monitor	0,0048 g
LCD Monitor⁵²	0,067 g
CRT TV	0,041 g
Flat panel TV	0,034 g

Quelle: UNU 2008

⁵² Unter diese Kategorie fallen auch Notebookbildschirme.

Chancerel (2010, 154) leitet die PGM-Inhalte pro Gerät über den Gewichtsanteil der Leiterplatten und der sich darauf befindlichen Palladium-Konzentration her.

Tab. 39: PGM-Inhalte pro Stück in verschiedenen Bildschirmtypen nach Chancerel 2010

Bildschirm-Typ	Durchschn. Gewicht	Massenanteil Leiterplatte	Gewicht Leiterplatte	Pd- Konzentration	Pd-Gehalt
CRT Monitor	10000g	5.0%	500g	10 g/t	5mg
LCD Monitor	3337g	6.9%	230g	14 g/t	3mg
CRT TV	14512g	4.7%	682g	3,4 g/t	2 mg
LCD TV	8600g	9.2%	791g	19 g/t	15 mg

Quelle: Chancerel 2010

Da beide Quellen auf die erheblichen Unsicherheiten und die sich widersprechenden Angaben hinweisen, soll hier annäherungsweise von einem Palladiumgehalt von 20mg für CRT-Fernseher, LCD-Monitore und Fernseher sowie von 5mg für CRT-Monitore ausgegangen werden⁵³.

Weitere Rohstoffe in Bildschirmen

Bei der LCD-Technik ist Indium, das für die Displays benötigt wird, ein relevanter Rohstoff. Bereits 2006 wurden bei einer Weltjahresproduktion von 580t 230t für Display-Technologien verwendet. Nach Abschätzungen von IZT und ISI (2009, 85) könnte der Bedarf bis zum Jahr 2030 nur für LCDs auf bis zu 1.581 t ansteigen.

4.4.3.2 Marktdaten: Verkauf, Bestand, Nutzung von Bildschirmen

Der Absatz von Bildschirmen ist global in den letzten 10 Jahren dramatisch angestiegen. Dafür lassen sich vor allem zwei entscheidende Treiber identifizieren: Zum einen die steigende Ausstattung der Haushalte mit Computern, zum anderen die Ablösung der alten Röhren- (CRT-)Geräte durch Flachbildschirme:

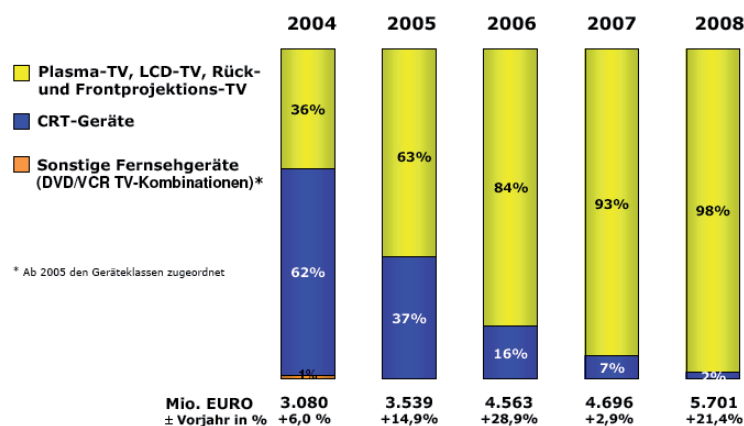
1. Die Ausstattung privater Haushalte in Deutschland mit Personal Computer (PC) hat sich in den letzten Jahren deutlich erhöht: Stand 1993 gerade mal in jedem fünften Haus halt (21 %) ein PC, so verfügten Anfang 2008 bereits drei Viertel (75 %) aller Haushalte über einen oder mehrere PC. Stark zugenommen hat der Anteil der Haushalte mit mobilen PC: Besaßen Anfang 2003 nur 11 % der privaten Haushalte

⁵³ Bei CRT-Monitoren liegen alle Angaben dicht um den Wert von 5mg, bei CRT-TV scheint besonders der Wert von 3,4g/t bei Chancerel sehr niedrig, selbst eine Kaffeemaschine würde nach ihren Angaben einen fast drei mal so hohen Wert aufweisen.

ein Notebook, Lap- oder Palmtop, waren es Anfang 2008 bereits 35 %. Zum Stichtag 1. Januar 2008 fanden sich insgesamt 47,6 Millionen PC in deutschen Haushalten, 1993 waren es noch 8,4 Millionen, 1998 bereits 16,8 Millionen und 2003 schon 32,2 Millionen. Damit hat sich die Anzahl der PC in den letzten 15 Jahren beinahe versechsfacht (vgl. EVS 2009).

- Die rasante Ablösung von CRT-Geräten durch Flachbildschirme zeigt die folgende Abbildung. Danach haben die klassischen Röhrengeräte im Bereich Fernseher innerhalb von nur fünf Jahren einen Rückgang beim Umsatz von 62% auf 2% erleiden müssen. Dabei muss natürlich berücksichtigt werden, dass ein Flachbildschirm deutlich teurer ist als ein CRT-Gerät (in 2009 durchschnittlich 838 Euro im Vergleich zu 182 Euro, vgl. Bitkom 2009), aber auch bei Flachbildschirmen ist ein Preisrückgang zu beobachten: 2005 kostete ein durchschnittliches Geräte noch 1333 Euro (vgl. ebd.). Studien der EU zu Energie verbrauchenden Produkten gehen davon, dass der Absatz an TV-Geräten bis zum Jahr 2010 auch weiterhin um jährlich zwei Prozent ansteigen wird (vgl. ebd.).

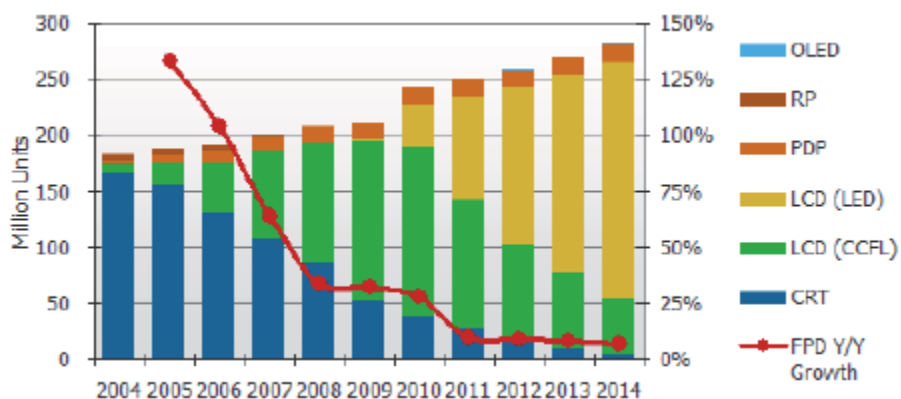
Abb. 50: Umsatz TV-Geräte 2004-2008 (in Mio. Euro)



Quelle: GFU 2008

Auf globalem Maßstab ist eine ähnliche Entwicklung zu beobachten. Abb. 51 zeigt den Anteil verschiedener Typen von TV-Geräten auf globalem Maßstab in einer Projektion bis zum Jahr 2014; danach werden CRT-Geräte bald vollständig vom Markt verschwinden, Plasmabildschirme ihren Marktanteil nur geringfügig ausbauen können und LCD-Geräten den Markt hauptsächlich dominieren.

Abb. 51: Globale Marktentwicklung von TV-Geräten



Quelle: Grieger 2010

Eine ähnliche Entwicklung ist bei den Computer-Monitoren zu beobachten. Tab. 40 zeigt die Entwicklung für Computer in der EU25. Zwischen den Jahren 2000 und 2006 haben auch hier die Flachbildschirme die CRT-Geräte völlig verdrängt.

Tab. 40: Entwicklung der Neuverkäufe für Computerbildschirme in der EU in Mio. Stück

Jahr	Notebooks	CRT-Monitore	Flachbildschirme
2000	6	24	0
2001	7	20	2
2002	8	17	5
2003	11	10	15
2004	15	6	20
2005	20	4	26
2006	23	2	32
2007	28	0	36
2008	31	0	38

Quelle: UNU 2008, 74

Tab. 41 zeigt die Veränderung im Gesamtmarkt Bildschirme für Deutschland in Stückzahlen. Der Absatz von LCD-Fernsehern hat sich in nur vier Jahren auf 5,9 Mio. nahezu verfünffacht.

Tab. 41: Verkaufszahlen für Bildschirme in Deutschland 2005-2008 (in 1.000 Stück)

	2005	2006	2007	2008	2009
CRT-TV	4.060	2.730	1.435	639	150
LCD-TV	1.235	2.570	3.883	5.901	7.553
Plasma-TV	300	450	528	736	752

Computer-Monitore	3.208	3.100	3.441	3.464	3.251
Notebooks	1.945	2.280	3.010	4.433	6.322

Quelle: GFU 2008, 2009

Für das Jahr 2010 erwartet der Branchenverband Bitkom mit einem regelrechten „Kaufrausch“ für Flachbildfernseher und rechnet mit einem Absatz von ca. 9,6 Mio. Geräten. Gründe für das außergewöhnlich starke Wachstum sind laut BITKOM neben der anziehenden Konjunktur vor allem die Fußball-Weltmeisterschaft, der Durchbruch des hochauflösenden Fernsehens sowie das große Interesse an neuen Technologien wie Hybrid-TV oder zunehmend auch 3D, vom Trend zu 3D profitieren auch die Plasma-Fernseher, die knapp 870.000 Geräte ausmachen (vgl. Bitkom 2010a).

Bestand

Das Statistische Bundesamt Deutschland hat in seiner Einkommens- und Verbrauchsstichprobe angegeben, dass in deutschen Haushalten im Jahr 2008 insgesamt 57,6 Mio. Fernseher vorhanden waren, davon etwa 6,8 Mio. Flachbildschirme.

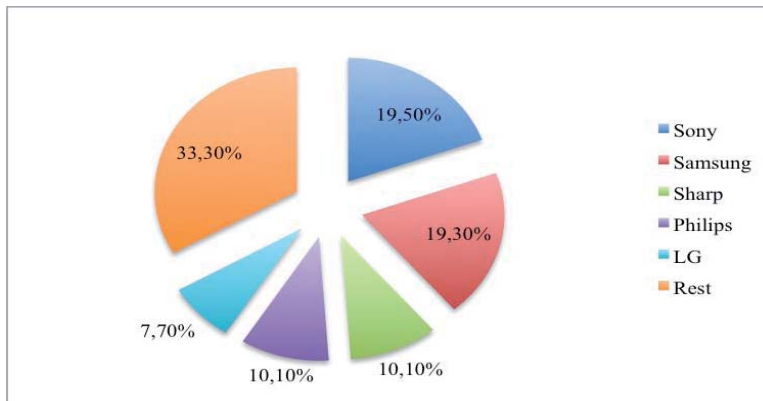
Zusätzlich besaßen die deutschen Haushalte ca. 29,5 Mio. PCs, davon 13,5 Mio. Notebooks (vgl. Destatis 2009). Hinzu kommen PCs und Notebooks, die gewerblich genutzt werden.

4.4.3.3 Akteure des Bildschirmmarktes

Hersteller und Marktanteile

Die Bildschirm- und Monitorindustrie ist deutlich breiter gefächert als beispielsweise der Handymarkt. 2008 hielten die Top Fünf der Hersteller von Monitoren weltweit ca. drei Viertel der Marktanteile (vgl. Website Prad). Bei LCD-Bildschirmen führte Sony Ende des Jahres 2007 den Markt mit 19,5% an, gefolgt von Samsung (19,3%). Sharp und Philips teilten sich den dritten Platz mit je 10,1%. LG konnte in diesem Zeitraum einen Marktanteil von 7,7% erreichen (vgl. Website DisplaySearch). Die Produktion von CRT-Geräten wurde 2009 bis auf einige Spezialgeräte eingestellt, so dass hierzu keine aktuellen Daten vorliegen.

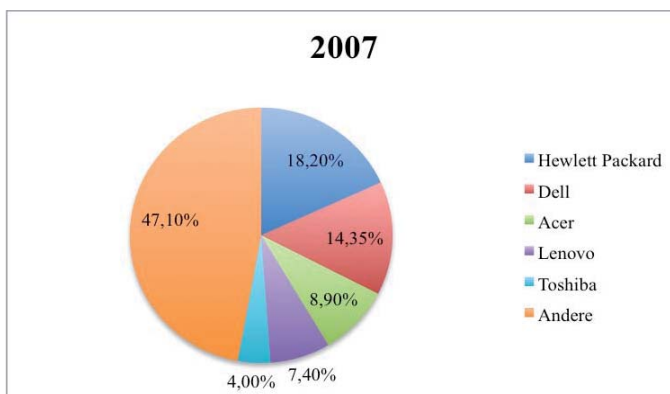
Abb. 52: Weltweite Marktanteile LCD-Bildschirme 2007



Quelle: Website DisplaySearch

Eine Besonderheit bilden wiederum LCD-Bildschirme in Notebooks. Hier sind Unternehmen vertreten, deren Kompetenzen vor allem in der Computertechnik liegen. Die Bildschirme werden als Vorleistung eingekauft, die abfallwirtschaftliche Produktverantwortung liegt beim letztendlichen Produzenten. In einer weltweiten Betrachtung führen HP und Dell vor Acer, Toshiba und Lenovo. Jedoch sind die danach folgenden Hersteller mit ähnlich hohen Anteilen am Markt vertreten. 2007 wurden 18,2% des Marktes von HP bedient, die damit ihren Marktanteil gegenüber 2006 um 30% erhöhen konnten. Im gleichen Zeitraum erreichte Dell einen Marktanteil von 14,35%. Als drittgrößter Hersteller konnte sich Acer mit 8,9% am Markt platzieren. Auf den weiteren Rängen stehen Lenovo mit 7,4% und Toshiba mit 4,0%. Acer erzielte einen Zuwachs von 32,9% und ist damit der am schnellsten wachsende Hersteller in 2007 gewesen.

Abb. 53: Weltweite Marktanteile Notebookhersteller 2007



Quelle: Gartner 2009

Im Gegensatz zum Sektor Mobiltelefone gibt es für Bildschirme keine speziellen Vertriebswege, insofern sind hier vor allem die großen Elektronikmarktketten für den Verkauf relevant. Insgesamt wird die Zahl der Rücknahmestellen in diesem Bereich auf ca. 30.000 geschätzt (vgl. Alkert 2003, 50).

4.4.3.4 Sammlung, Recycling, Export

Das Recycling von Bildschirmen ist von besonderer Relevanz, da in den letzten Jahren ein sehr schneller Austausch des Bildschirmbestands von CRT- zu LCD-Geräten begonnen hat. Im Vergleich zu Mobiltelefonen ist die Sammelrate aussortierter Bildschirme deutlich höher, Chancerel (2010, 95) schätzt sie für CRT-Geräte auf 99%.

Sammlung

Die nachfolgende Tabelle zeigt die mengenmäßige Relevanz von Bildschirmen bei der Sammlung von EAG im EAR-System. Die Statistik unterscheidet zwischen Datensichtgeräten und TV-Geräte, ermöglicht jedoch keine Unterscheidung zwischen CRT-Geräten und Flachbildschirmen. Beide Gruppen zusammen machen etwa 2/3 der Sammelgruppe 3 aus, was etwa 130.000t entspricht.

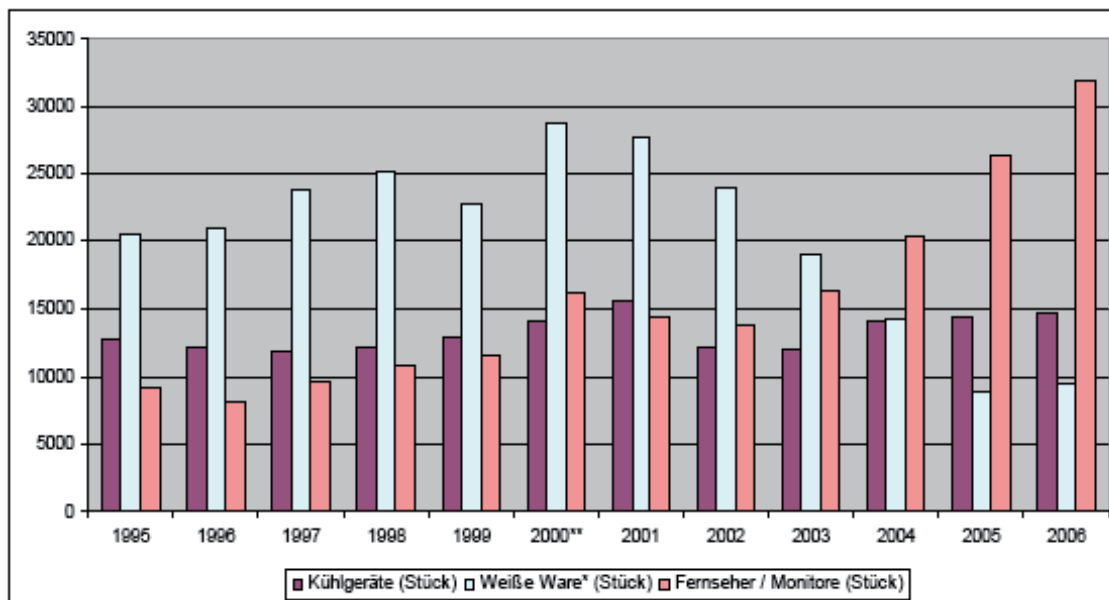
Tab. 42: Zusammensetzung gemischter Sammelgruppen in Deutschland

Ergebnisse der Statistischen Analyse im ear-System ab:			24.03. 2006	01.01. 2007	01.01. 2008	01.03. 2009	01.01. 2010	01.01. 2011
Kategorie	Kat. Nr.	Geräteart	Anteil %	Anteil %	Anteil %	Anteil %	Anteil %	Anteil %
Geräte der Informati- ons- und Telekommuni- kationstechnik	3	Daten- sichtgeräte	20,00	20,00	22,30	24,11	26,40	23,40
Geräte der Unterhal- tungselektronik	4	TV-Geräte	45,00	45,00	42,80	41,36	40,20	41,98

Quelle: EAR 2011

Für das Jahr 2007 hat das BMU (2008) CRT-Geräte gesondert ausgewiesen, die damals 127.948t ausmachten. Daraus lässt sich schließen, dass Flachbildschirme erst in den letzten Jahren in relevanten Mengen als EAG angefallen sind. Seitdem findet ein sehr rascher Austausch alter CRT-Geräte durch Flachbildgeräte statt, die zu einem starken Anstieg an CRT-EAG führt. Abb. 54 zeigt die Entwicklung am Beispiel der Sperrmüllsammlung in Wuppertal. Dort hat sich die Anzahl der entsorgten Geräte von 2002 bis 2006 mehr als verdoppelt.

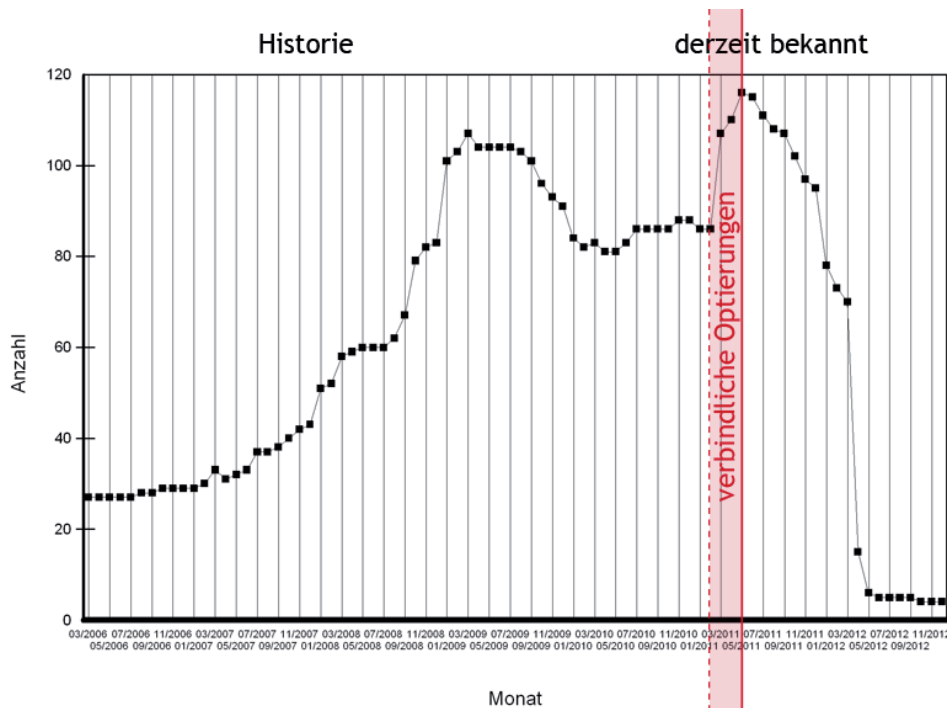
Abb. 54: Zusammensetzung der Sperrmüllsammlung in Wuppertal



Quelle: Abfallbericht Wuppertal 2008

In den vergangenen Jahren wurden relevante Mengen an Bildschirmen durch optierende Kommunen als ÖrE verwertet. Wie in Abb. 55 erkennbar, ist dieser Anteil aufgrund gesunkener Verwertungserlöse auf fast null zurückgegangen.

Abb. 55: Anzahl optierte ÖrE für Sammelgruppe 3



ling 2010) legen als Durchschnittsgewicht für beide Produktgruppen 20kg zu Grunde. Danach wurden in 2008 mehr als 330.000 Fernseher und 65.000 Monitore aus Deutschland exportiert, welche zwischen 50-230kg PGM enthielten.

Diese Angaben erfassen allerdings nur den Teil der legal exportierten und beim Zoll angemeldeten Geräte. Bei den Fernsehern ergibt z.B. ein Abgleich mit der nigerianischen Importstatistik ganz andere Größenordnungen: Danach wurden im Jahr 2006 aus Deutschland alleine nach Nigeria 17,5 Mio. Fernsehempfangsgeräte und Videomonitore exportiert. Die Höhe der Angaben in der nigerianischen Importstatistik werden allerdings wiederum von verschiedenen Experten als deutlich zu hoch eingeschätzt (vgl. Sander/ Schilling 2010).

Trotzdem belegen die Zahlen deutschen Statistik die Relevanz der Exportproblematik: Allein über den Hamburger Hafen würden demnach etwa 1-3 Mio. Monitore pro Jahr exportiert, der Export auf dem Landweg nach Osteuropa wird von Janz et al. (2009) insgesamt als noch relevanter eingeschätzt, Bildschirme spielen dabei seiner Einschätzung nach eine besonders wichtige Rolle. Eine relevante Quelle für diese Export ist danach besonders bei Bildschirmen die Beraubung von Sperrmüllsammelungen, diese Geräte werden anschließend als Gebrauchtgeräte im Ausland verkauft, dort werden in der Regel nur Kupferelemente und der Stahlrahmen einem Recycling zugeführt. Insgesamt schätzt Chancerel (2010, 95), dass etwa 20% der in Deutschland ausrangierten nur einem solchen „informellen Recycling“ unterzogen werden.

Tab. 43: Bildschirme: Exportmengen in Stück für einzelne Zielländer nach DESTATIS und ZAPP (Bezugsjahr 2008, in t)

	Außenhandelsstatistik	ZAPP-System Hafen Hamburg unter 3.000EUR
Fernseher nach Nigeria	3000	5862
Fernseher nach Ghana	174	616
Monitore nach Vietnam	840	421

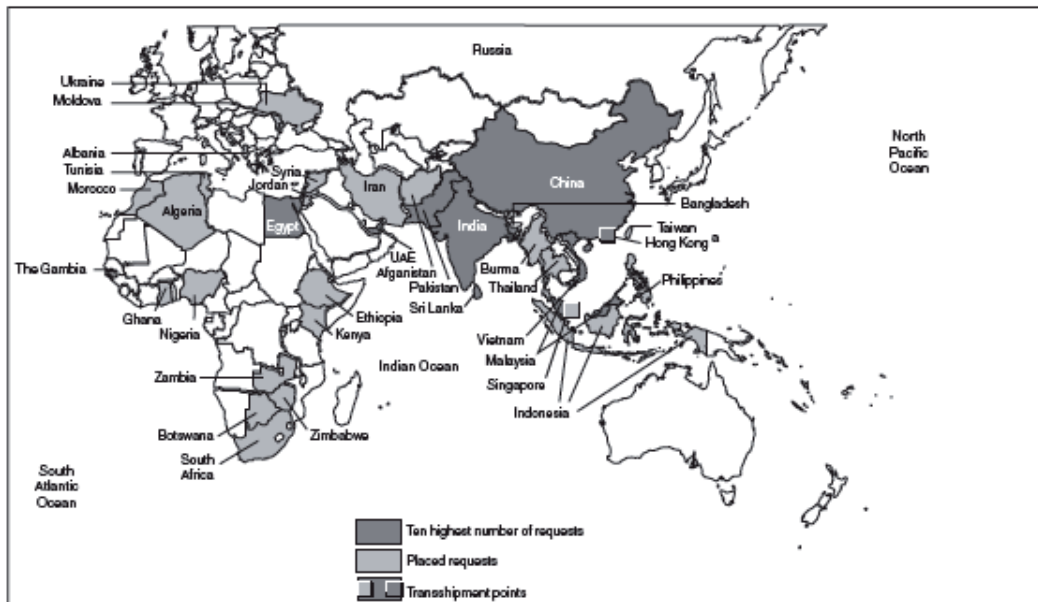
Quelle: Sander/ Schilling 2010

Sander/ Schilling 2010 untersuchten Internetportale nach Kaufanfragen nach Bildschirmen und anderen EEE-Geräten. Über einen Zeitraum von drei Monaten wurden dabei 230 Anfragen nach insgesamt 7,5 Mio. CRT-Geräten aus Entwicklungsländern registriert. Mehr als 75% der Händler boten dabei weniger als 10 Dollar pro Stück, etwa die Hälfte weniger als 5 Dollar, so dass davon ausgegangen werden muss, dass hier tatsächlich nicht mehr funktionsfähige Altgeräte gesucht wurden. In den Importländern werden diesen Altgeräten werthaltige Fraktionen wie Kupferspulen entnommen und die Geräte anschließend auf überwiegend wilden Deponien entsorgt.

Etwa 70% dieser Anfragen konnten in Entwicklungsländern lokalisiert werden, hauptsächlich in China und Indien, teilweise aber auch in Afrika. Abb. 56 zeigt die globale Verteilung der von GAO (2008) ausgewerteten Anfragen nach Bildschirmen in interna-

tionalen Internethandelsportalen (die dunkel markierten Regionen zeigen die 10 wichtigsten Absatzmärkte).

Abb. 56: Anfragen nach gebrauchten Bildschirmen auf Internetplattformen



Quelle: GAO 2008

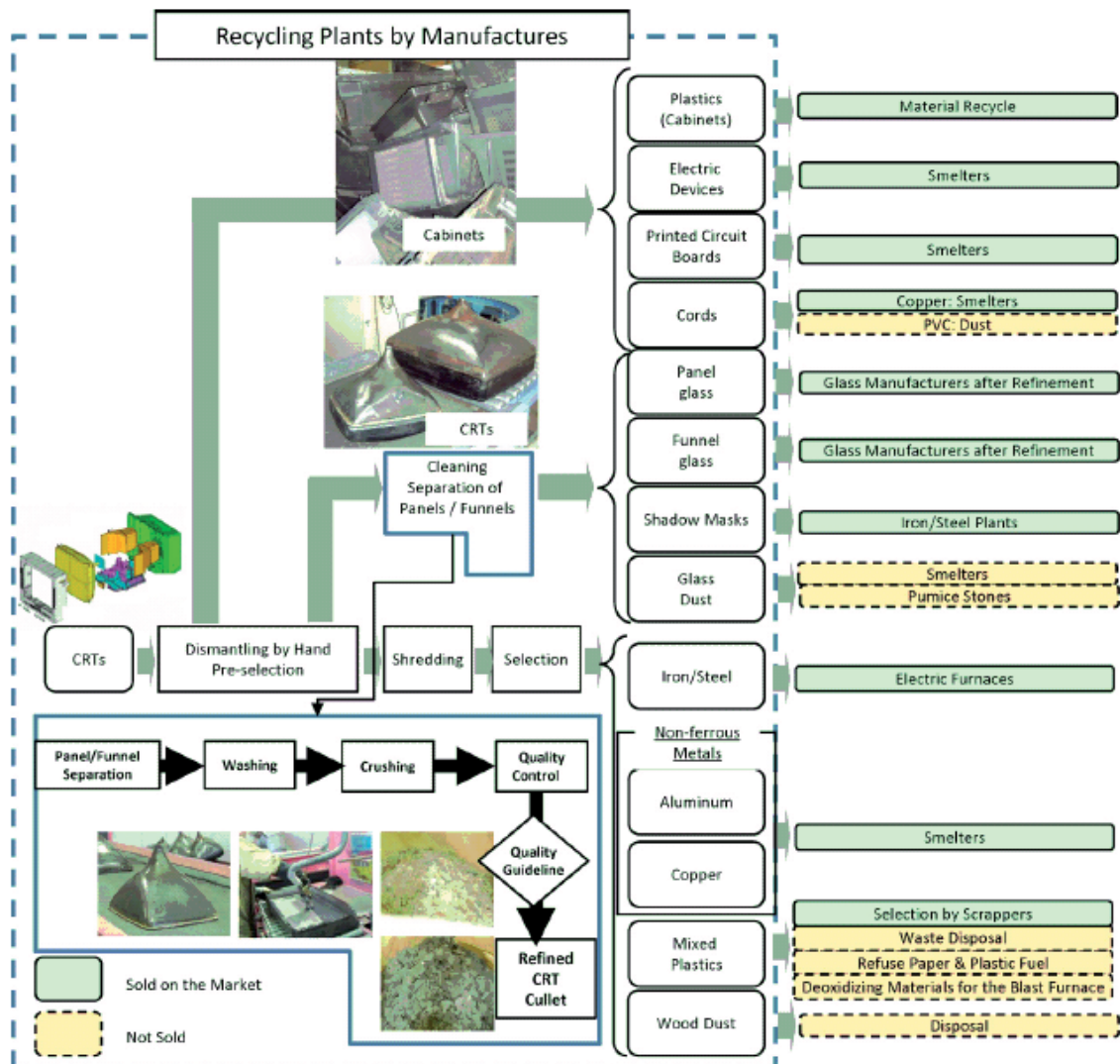
Insgesamt ist der überwiegend illegale Export von Altgeräten vor allem über die osteuropäische Grenze nur schwer abzuschätzen. Basierend auf den Untersuchungen von Sander/ Schilling und Janz et al. kann eine Exportmenge von ca. 3-5 Mio. Geräten jährlich vermutet werden.

Recycling/Verwertung

CRT-Geräte

Abb. 57 zeigt die unterschiedlichen Stufen beim Recycling eines CRT-Monitors. Im ersten Schritt werden die Kabel entfernt und das Plastikgehäuse geöffnet. Anschließend wird die Ablenkeinheit entfernt, die wegen ihres Kupfergehalts einen wesentlichen Teil des Restwerts ausmacht. Ebenfalls separat erfasst werden die Lautsprecher und die Kabel im Inneren des Monitors. Danach kommen die Geräte in die Bildröhrentrennung, hier gibt es je nach Durchsatz unterschiedliche Techniken (vgl. unten: LCD-Recycling). Nach der Trennung von Konus- und Frontglas wird die Lochmaske entfernt und die phosphorhaltige Leuchtschicht abgesaugt. Die Abbildung zeigt grün umrandet die Bestandteile, für die noch ein Absatzmarkt existiert.

Abb. 57: Schematische Darstellung CRT-Recycling



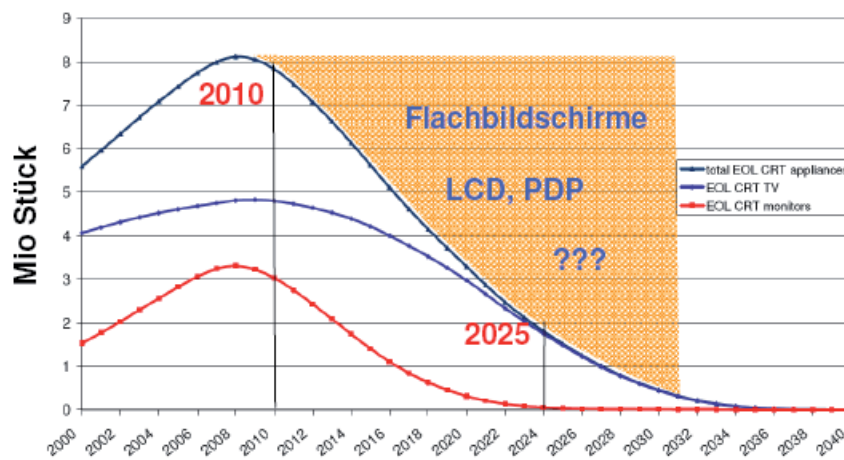
Quelle: MOE/ METI 2006b

Das Metallchassis der Bildschirmgeräte inklusive der montierten Baugruppen werden in der Regel mechanischen Aufbereitungsanlagen zugeführt, in der Materialien stufenweise zerkleinert werden, nach jeder Zerkleinerungsstufe durch Kettenzerspanner, Rotorscheren und Shredder werden die frei vorliegenden Materialien mit physikalischen Verfahren (Magnettrennung, Wirbelstromabscheidung) aussortiert (vgl. Fröhlich 2009, 561). Das restliche Material wird in eine Aufschlussmahlung geleitet, in der die Materialien durch Granulatoren oder Hammermühlen auf Stücke von weniger als 10mm zerkleinert werden, Metalle und Kunststoffe können dadurch weitestgehend voneinander getrennt werden. Im Laufe dieses Prozesses werden eine Fraktion Eisenmetalle, Buntmetalle und sortenreine Kunststoffe gewonnen, die verbleibenden Reststoffe gelangen als heizwertreiche Fraktion in die energetische Verwertung. Für ein möglichst vollständiges PGM-Recycling wäre das Abtrennen der PGM-haltigen Leiterplatte vom Chassis vor dem ersten mechanischen Zerkleinerungsprozess notwendig, um die Lei-

terplatten den beschriebenen Smelter-Prozessen zuführen zu können. Hierauf scheint aber häufig verzichtet zu werden (vgl. ebd., 562), da hierfür weitere händische Demontageschritte notwendig wären, so dass das PGM anschließend dissipativ in den Reststoffen verloren geht. Chancerel (2010, 81) kommt zu dem Ergebnis, dass bei ca. 24% der Bildschirme (sowohl CRT- als auch Flachbildgeräte) eine manuelle Demontage der Leiterplatten stattfindet, die aufgrund der geringeren Edelmetallgehalte in der Regel weiter vorbehandelt werden, so dass auch hier wie bei einer mechanischen Vorbehandlung etwa 60% der PGM zurück gewonnen werden.

Durch die dramatisch sinkenden Marktanteile von CRT-Monitoren bricht zudem der wichtigste Abnehmer-Markt für das bleihaltige Glas weg, Bildröhrengeräte werden derzeit fast nur noch in China verkauft. Adäquate Alternativen für den hochwertigen Einsatz von Sekundär-CRT-Glas sind bisher noch nicht gefunden. Alternative Verwertungspfade wie der Einsatz der Gläser in Kupfer- oder Bleihütten als Ersatz für mineralische Zuschlagstoffe mit der Möglichkeit der Bleirückgewinnung sind nach Expertenmeinungen nicht geeignet, einen größeren Anteil der anfallenden Mengen zu verarbeiten. Aktuell werden weitere Einsatzmöglichkeiten, z.B. beim Behälterglas, intensiv untersucht. Bisher wurde das Glas auch im Bergversatz zur Verfüllung untertägiger Hohlräume eingesetzt. Sowohl die neue europäischen Abfallrahmenrichtlinie mit ihrer neuen Recyclingdefinition und der fünfstufigen Abfallhierarchie als auch die Recyclingdefinition gemäß dem Recast der WEEE-Richtlinie erkennen diesen Entsorgungspfad aber nicht mehr als stoffliche Verwertung an, so dass die im neuen WEEE-Richtlinien-Entwurf geforderte für Wiederverwendung und stoffliche Verwertung bei Bildschirmen von 65% in Zukunft mit den bestehenden Strukturen kaum zu erreichen sein dürfte (vgl. SRU 2008, 561). Es ist zu befürchten, dass dadurch der Anreiz für den illegalen Export von CRT-Geräten in Entwicklungsländer noch verstärkt wird, was einen zusätzlichen Potenzialverlust für das PGM-Recycling bedeuten würde. Abb. 58 zeigt, dass der Rücklauf an CRT-Geräten im Jahr 2010 zwar seinen Höhepunkt überschritten haben dürfte, aber vor allem bei Fernsehgeräten noch über das Jahr 2030 anhalten wird.

Abb. 58: Dynamische Simulation des Anfalls von EOL-CRT-Geräten



Quelle: Grieger 2010

LCD-Geräte

Bei den LCD-Geräten wird zunächst das eigentliche LCD-Panel aus seinem Stahlrahmen und vom Kunststoffgehäuse mit Lautsprechern etc. getrennt, die bei einem 37 Zoll-Gerät etwa die Hälfte des Gewichts (Gesamt: ca. 20.5 kg) ausmachen (ohne eventuelle Ständer oder Haltevorrichtungen) (vgl. Grieger 2010, 5). Ein entscheidender Schritt bei der Behandlung von LCD-Geräten ist die quecksilber-haltige Hintergrundbeleuchtung, etwa 90% aller zur Zeit am Markt erhältlichen LCD-Geräte enthalten eine solche Hintergrundbeleuchtung, bei den größeren Geräten nahezu jedes (vgl. Kopacek 2008, 437). Die Beleuchtung besteht aus einzelnen Röhren (*Cold Cathode Fluorescent Lamps - CCFLs*), die jeweils etwa 3mg Quecksilber enthalten und von denen in einem Standardfernseher (40 Zoll) etwa 20-25 Stück enthalten sind. Untersuchungen haben ergeben, dass bei der üblichen Schüttung von Bildschirmen in größere Transportgefäße in etwa 30% aller Geräte mindestens eine dieser CCFLs zu Bruch geht und Quecksilber in einer Konzentration freisetzt, der Menschen nicht über längere Zeiträume ausgesetzt sein dürfen (vgl. EERA 2010).

Laut EAG-Richtlinie muss die Hintergrundbeleuchtung bei Geräten mit einer Bildfläche über 100cm² demontiert werden. Von entscheidender Bedeutung ist dabei allerdings die Recyclingfreundlichkeit der Geräte: Nur etwa 40% aller Hersteller ermöglichen durch ihr Produktdesign eine schnelle manuelle Demontage (vgl. Kopacek 2008, 437). Die vertiefte händische Demontage von LCD-Geräten, die eine Entnahme der PGM-haltigen Leiterplatte ermöglichen würde, setzt daher in der Regel teure Arbeitsplätze mit Luftabzug voraus. Dementsprechend schätzt Chancerel (2010, 81), dass in diesem Segment auch nur 40% der enthaltenen PGM zurück gewonnen werden können.

Tab. 44 gibt einen Überblick über die Kostenstruktur bei der Behandlung und beim Recycling von Fernsehern (auf Basis von Angaben des WEEE Forums für etablierte Systeme in 2005, vgl. UNU 2008, 180). Danach ist das Recycling von LCD-Geräten mit

deutlich höheren Gesamt-Kosten verbunden, die vor allem auf der komplizierteren Demontage beruhen. Die Übersicht zeigt aber auch, dass der Rückgewinnungsprozess für Metalle beim LCD-Fernseher lukrativer ist als beim CRT-Gerät, so dass hier höhere Anreize bestehen könnten, die Leiterplatten separat zu entnehmen.

Tab. 44: Kostenstruktur für das Recycling von Fernsehern 2005, EU-Durchschnittswerte

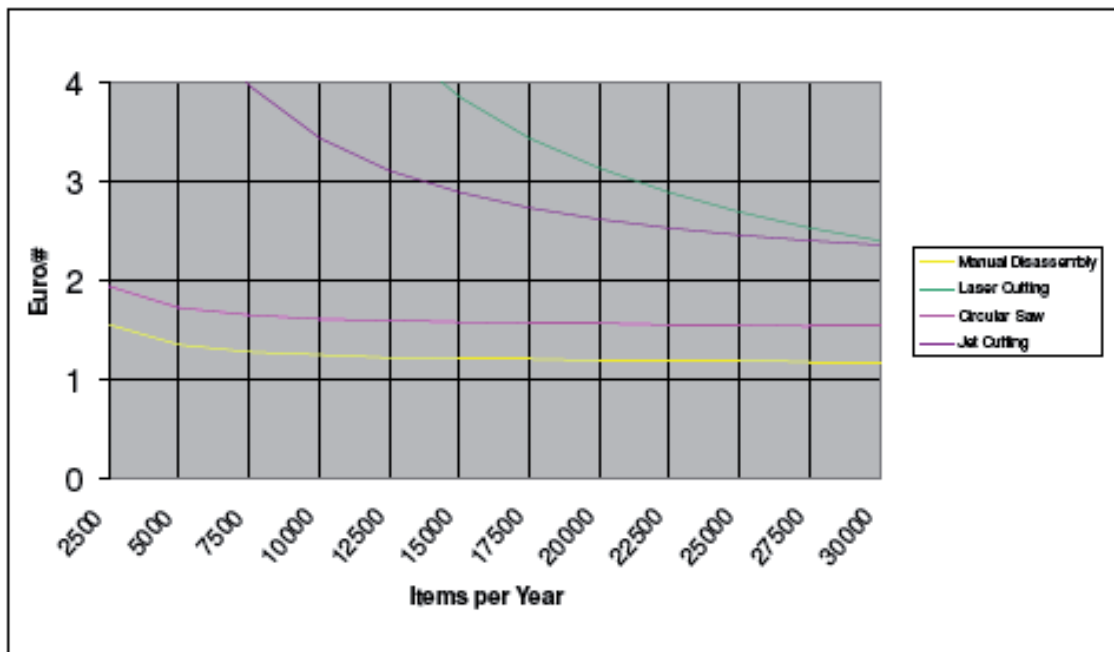
Category	Cat.3C			Cat.4C		
Process	Total	Costs	Revenues	Total	Costs	Revenues
Transport and collection (incl. access to WEEE)	€0.66	€0.66		€3.99	€3.99	
Other costs	€0.28	€0.28		€2.13	€2.13	
Shredding, sorting, dismantling, pre-treatment	€7.70	€7.70		€13.96	€13.96	
Incineration and landfill	€0.09	€0.10	(€0.01)	€0.86	€0.89	(€0.03)
Recycling processes	€0.03	€0.04	(€0.02)	€0.09	€0.15	(€0.06)
Recovery processes	(€2.02)	€1.30	(€3.32)	(€3.59)	€5.83	(€9.42)
Total	€6.74	per piece		€17.44	per piece	
Total	€1.33	per kg		€0.62	per kg	

Legende: 4B=CRT-TV, 4C=LCD-TV

Quelle: UNU 2008

Die Kostenstruktur beim LCD-Recycling ist jedoch auch stark vom Umsatz der Recyclinganlagen abhängig (vgl. Abb. 59), so dass in den kommenden Jahren mit sinkenden Demontagekosten zu rechnen sein wird, womit auch höhere Anreize zur Verwertung weiterer Bestandteile wie der Leiterplatte verbunden sein könnten. In Deutschland haben sich daher auch nur einige wenige Unternehmen auf das Recycling von Bildschirmen spezialisiert, um die entsprechend notwendigen Mengen am Markt erreichen zu können. Diese Unternehmen sind zunehmend gezwungen, ihren Betrieb von der CRT-Verwertung auf Flachbildschirme umzustellen und dafür rentable Techniken zu entwickeln.

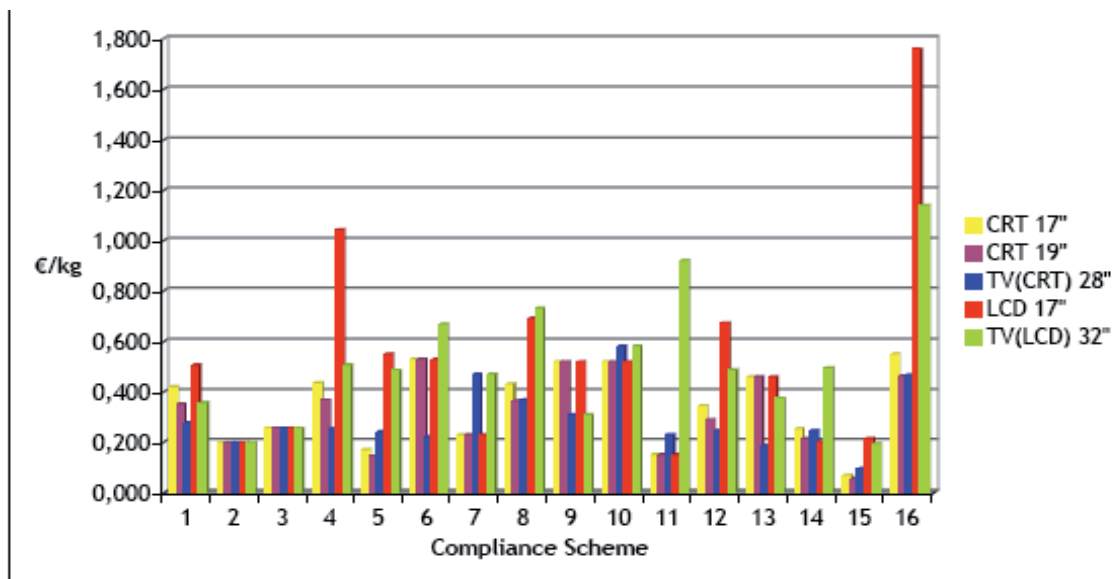
Abb. 59: Kostenstruktur für das Recycling von LCD-Geräten in Österreich, 2008



Quelle Kopacek 2008

Den reinen Behandlungs-Kosten stehen die Behandlungs- und Verwertungskosten gegenüber, die nach der WEEE-Richtlinie von den Herstellern getragen werden müssen. Für Bildschirme zeigt Abb. 60 die unterschiedlichen Niveaus der Verwertungsgebühren innerhalb der EU. In Extremfällen liegt für identische Produkte bis zu einem Faktor 9 zwischen den einzelnen Ländern.

Abb. 60: Verwertungskosten für Bildschirme in EU-Mitgliedsstaaten



Quelle: Magalini/ Huisman 2006

Nach Einschätzungen von Experten liegt Deutschland dabei eindeutig am untersten Ende der Behandlungs- und Verwertungskosten, wie sie in der Abbildung anonymisiert für die EU-Mitgliedstaaten dargestellt sind. Diese an sich positive Tatsache hat allerdings zwei Effekte, die die Ressourceneffizienz des Systems negativ beeinflussen:

- Zum einen verringern die niedrigen Kosten die Anreize für die Hersteller, die Entsorgungskosten beim Produktdesign zu berücksichtigen.
- Zum anderen sind die Vergütungen so niedrig, dass seit Inkrafttreten des ElektroG ein Rückgang der Behandlungsqualität – vor allem bei Bildschirmen – zu beobachten ist. Um die Kosten für Sammlung und Transport zu minimieren, werden diese häufig in einem dafür ungeeigneten Rollcontainer gesammelt.

Für Deutschland sind keine Zahlen bekannt, wie viele Leiterplatten aus Bildschirmen separat recycelt werden. In der Schweiz werden diese Daten erhoben, danach wurden 2008 keine Leiterplatten aus CRT-Geräten recycelt (vgl. SWICO 2009, 18).

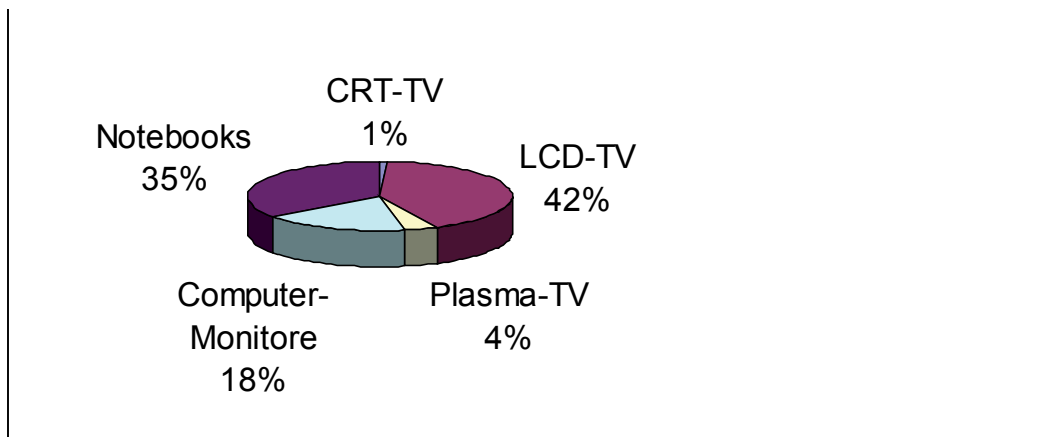
4.4.3.6 Gesamtabschätzung PGM-Relevanz von Bildschirmen

Nachfrage

Der jährliche Gesamtbedarf an PGM zur Herstellung von Bildschirmen (sowohl im Inland produzierte Geräte als auch Importe, vgl. Kap. 4.4.4.2), die in Deutschland in Verkehr gebracht werden, kann aufgrund der vorliegenden Daten zum PGM-Gehalt pro Gerät und den Verkaufszahlen auf insgesamt ca. 360kg geschätzt werden (vgl. Abb.

61). Von den insgesamt inklusive Notebooks 18 Mio. verkauften Bildschirmen entfielen 2009 noch 1% auf den Bereich CRT-TV, insgesamt 46% auf den Bereich Flachbildschirme (LCD und Plasma) und 53% auf LCD-Computerbildschirme (Monitore und LCD-Notebookdisplays).

Abb. 61: PGM-Nachfrage für die Produktion von Bildschirmen für Deutschland 2008 in Gramm



Quelle: Eigene Berechnungen nach den Angaben in Abschnitt 4.4.4.1 und 4.4.4.2

Recyclingpotenzial

Für die Abschätzung des PGM-Recyclingpotenzials wird auf Basis des Verlaufs des Ausstattungsgrades der Haushalte mit Fernsehern angenommen, dass 80% der Neukäufe ein altes CRT-Gerät und 10% einen alten Flachbildschirm ersetzen (hier werden häufig Flachbildschirme der ersten Generation gegen „HD ready“-Geräte ausgetauscht, vgl. SWICO 2009). Bei Computerbildschirmen wird aufgrund des niedrigeren Marktsättigungsgrades eine Ersatzquote von 80% angenommen (Aufteilung der ausrangierten Geräte: 80% LCD, 20% CRT). Die Größenordnung von 7,6 Mio. ausrangierten Computerbildschirmen erscheint auch bei einer angenommenen Lebensdauer von 3-5 Jahren angesichts einer Bestands von ca. 30 Mio. Geräten (s.o.) plausibel, bei den Fernsehgeräten liegt der Wert von 7,6 Mio. Geräten bei einer durchschnittlichen Lebensdauer von 10 Jahren (vgl. Chancerel 2010, 64) relativ hoch, hier sind in den letzten Jahren aber Sondereffekte durch den beschriebenen Austausch von CRT-Geräten zu berücksichtigen.

Sammlung

Im Gegensatz zu Mobilfunkgeräten findet eine Entsorgung von Bildschirmen über den Restmüll so gut wie nicht statt. Über das EAR-System werden wie beschrieben ca. 130.000t Bildschirme gesammelt. Aufgrund der deutlichen Gewichtsunterschiede zwischen CRT- und Flachbildschirmen lässt sich allerdings nur grob abschätzen, um wie viele Geräte es sich bei dieser Menge handelt (vor allem Flachbild-

Computerbildschirme sind deutlich leichter als ihre CRT-Variante). Bei den oben getroffenen Annahmen zu den Verhältnissen von CRT zu Flachbildschirmen bei ausrangierten Geräten ergäbe sich auf Grundlage der Angaben von Chancerel (2010, 150) ein Durchschnittsgewicht von ca. 5kg für Computerbildschirme und 12kg für Fernsehgeräte, was etwa 10 Mio. Datensichtgeräten und 6,5 Mio. Fernsehern entsprechen würde. Beide Werte liegen angesichts der berechneten Werte für ausrangierte Geräte relativ hoch, dies wird aber wiederum mit den Sondereffekten durch ausgetauschte CRT-Geräte zu erklären sein.

Die Exporte von Bildschirmen sind wie beschrieben schwer zu erfassen, geschätzt wurde ein Wert von ca. 3-5 Mio. Geräten. Unter den getroffenen Annahmen zu PGM-Inhalten und Verhältnis CRT und Flachbildschirm würde dies einen Verlust von ca. 70kg PGM pro Jahr bedeuten.

Behandlung

Die größten Verluste für die Kreislaufführung von PGM in Bildschirmen liegen bei der Behandlung von Altgeräten im Inland. Wie beschrieben liegen die Rückgewinnungsraten hier nur bei 40% für Flachbild- und 60% für CRT-Geräte. Dementsprechend gehen bei der Behandlung von CRT-Geräten 57,6kg, bei Flachbildschirmen 81,6kg PGM für die Kreislaufführung verloren. Für die Zukunft ist absehbar, dass der Anteil der Flachbildschirme an diesen Verlusten deutlich steigen wird.

Tab. 45: Verluste in der Kreislaufführung von PGM in Bildschirmen

Quelle: Eigene Berechnungen

Tab. 45 zeigt die wichtigsten Verlustpunkte in der Kreislaufführung von PGM in Bildschirmen. Daraus würde sich in Deutschland jährlich ein zusätzliches Recycling-Potenzial für PGM aus Bildschirmen von ca. 190kg ergeben, wenn die Leiterplatten flächendeckend manuell entnommen und recycelt würden.

4.5 Maßnahmenvorschläge

Ausgehend von den Analysen zu Verluststellen bei der Kreislaufführung von PGM in werden Strategien und Maßnahmen zur Vermeidung von PGM-Verlusten durch eine Verbesserung der internationalen Kreislaufführung von Elektronikschrott abgeleitet. Auf Grundlage eines strategischen Instrumenten-Mix, der unterschiedliche Akteure adressiert, werden dabei auch konkrete, vorrangig zu verfolgende Maßnahmen benannt.

Grundsätzlich haben die Untersuchungen der beiden Handlungsfelder Handys und Bildschirme ergeben, dass sich die Anreizstrukturen und Marktbedingungen für eine Schließung von Stoffkreisläufen durch hochwertiges Recycling in den beiden Berei-

chen trotz eines weitgehend identischen regulativen Rahmens deutlich unterscheiden: Während funktionsuntüchtige Handys wegen ihres hohen Edelmetallgehalts rentabel verwertet werden können, ist die Behandlung von Bildschirmen mit Kosten verbunden, die nicht durch die Erlöse der gewonnenen Materialien gedeckt werden. Daraus ergeben sich unterschiedliche Probleme, die in der Wahl der Instrumente berücksichtigt werden müssen und auch ein unterschiedliches staatliches Eingriffsniveau erfordern. Ganz pauschal ist bei gebrauchten Handys zu vermuten, dass ökonomische Instrumente einen deutlichen Effekt zur Verbesserung der PGM-Kreisläufe erzielen könnten, während bei Bildschirmen auf jeden Fall flankierende staatliche Maßnahmen zu ergreifen sein werden.

4.5.1 Bewertung und Grenzen der bisherigen Einzelmaßnahme

Export und Kreislaufführung von Elektronikschrott wird regelmäßig als eines der wichtigsten Problemfelder der Abfallwirtschaft identifiziert und auch bereits in vielen Projekten und Initiativen behandelt (vgl. Jaron 2010)⁵⁴. Im Bereich WEEE haben sich zahlreiche Initiativen gebildet, die versuchen das bestehende Regelwerk aus zahlreichen unterschiedlichen Perspektiven zu ergänzen und zu optimieren. Dazu gehören beispielsweise:

- die von der UN geleitete StEP (Solving the e-waste problem)-Initiative, die sich im Anschluss an die „Electronic Goes Green“- Konferenz 2004 in Berlin gegründet hat und u.a. explizit auf die Schließung von Stoffkreisläufen abzielt,
- das Basel Action Network, in dem sich unterschiedliche NGOs für den Basel Total Ban (das totale Verbot für Exporte von EEE oder EAG in Entwicklungsländer) einsetzen,
- die European Recycling Plattform, in der unterschiedliche EEE-Hersteller organisiert sind und sich u.a. für ein hochwertiges Recycling der enthaltenen Edelmetalle einsetzen, oder
- das WEEE-Forum, ein Forum von Vertretern freiwilliger Rücknahmesysteme für WEEE (vgl. Widmer et al. 2005, 450).

Diese Akteure sollten unbedingt in die Entwicklung von Maßnahmen eingebunden werden, da sie in der Regel über ein Netz von Akteurskontakten und Informationsquellen verfügen, die angesichts der beschriebenen Datenlücken für innovative Lösungs-

⁵⁴ Jaron, A. (2010): Stolpersteine auf dem Weg zur globalen Kreislaufwirtschaft. In: Müll und Abfall, Jg. 42, H. 6, S. 257.

ansätze bzw. die Umsetzung von Aktivitäten zur Verbesserung der PGM-Kreislaufführung unverzichtbar sein dürften.

Als grundsätzliches Problem kann aber die fehlende Koordination dieser Einzelmaßnahmen identifiziert werden. Sowohl in der Schließung von einzelnen Stoffkreisläufen als vor allem auch zur Bewältigung der internationalen Dimension legaler und illegaler Exporte von Elektronikgütern gibt es bisher vor allem von einzelnen Akteuren (z.B. von StEP) initiierte Maßnahmen. Diesen fehlt es in der Regel sowohl an Aufmerksamkeit als auch an Akzeptanz⁵⁵.

Echte systemische Innovationen sind in diesem Bereich daher nur durch ein abgestimmtes Vorgehen aller Beteiligten entlang der kompletten Wertschöpfungskette sowie durch ein integriertes Maßnahmen-Portfolio zu erwarten, das flexibel auf die einzelnen Produkte anpassbar wäre. Diese müssten sowohl im In- und Ausland ansetzen dazu angesichts eines zu vermutenden latenten Eigeninteresse der Wirtschaftsakteure freiwillige Maßnahmen als sonst auch ordnungsrechtliche Mittel einsetzen..

Dazu soll im Folgenden ein Maßnahmenportfolio untersucht werden, dessen Einzelmaßnahmen auf unterschiedlichen Ebenen ansetzen, verschiedene Akteure adressieren und sich im Optimalfall gegenseitig verstärken können. Abb. 62 ordnet die untersuchten Einzelmaßnahmen diesen Dimensionen zu⁵⁶.

⁵⁵ Weiterer Forschungsbedarf besteht daher vor allem zum Entwicklungspotenzial der unterschiedlichen bestehenden nationalen und internationalen Kooperationsplattformen (BAN, StEP etc.), die in Zukunft eine solche Vermittlerfunktion zwischen den einzelnen Regulierungsebenen und Akteursstrukturen ausfüllen könnten.

⁵⁶ Grundsätzlich könnten die Einzelmaßnahmen natürlich auch anders ausgestaltet werden, z.B. ein freiwilliges Pfandsystem. Wie im Folgenden dargestellt, empfiehlt sich für den Bereich EAG diese Zuordnung.

Abb. 62: Maßnahmen-Portfolio

Inland	Ausland	
Sammelsysteme	Technologie- und Knowledgetransfer	Freiwillig
Handypfand Erfassungsmonitoring Export-Kriterien		Ordnungsrechtlich

Quelle: Eigene Darstellung

Im Folgenden soll zunächst als grundsätzliche Strategie der Ansatz der erweiterten Herstellerverantwortung und die Substitution von ressourcenintensivem Primär-PGM durch Sekundärrohstoffe beschrieben werden.

4.5.2 Strategieansatz der erweiterten Herstellerverantwortung

Die grundsätzliche Strategie zur Verbesserung der Kreislaufführung von PGM aus Elektrogeräten/ Elektroaltgeräten liegen in einer effektiveren Umsetzung des Prinzips der auf die Nachnutzungsphase erweiterten Produktverantwortung (EPR – extended producer responsibility). Maßnahmen zu einer Verbesserung der Kreislaufführung von PGM in EEE dürfen sich aufgrund der beschriebenen Komplexität der Problemlage, wenn sie erfolgreich sein wollen, nicht auf einzelne Stufen des Produktlebenszyklus begrenzen.

Der Ansatz der Produktverantwortung basiert darauf, dass vor allem der Hersteller über die dafür notwendigen Informationen, Einflussmöglichkeiten auf die Produktgestaltung, finanzielle Mittel etc. verfügt.

Die OECD definiert EPR als einen Ansatz der Umweltpolitik, der die Verantwortung der Hersteller auf die End of Life-Phase ihrer Produkte ausweitet (OECD 2001). Diese Verantwortung umfasst verschiedene Dimensionen, die in unterschiedlichen EPR-Systemen auch unterschiedlich ausgeprägt sein können (vgl. Osibanjo/ Nnorom 2008, 846):

1. Produktverantwortung im engeren Sinne: Der Hersteller ist für alle Schäden verantwortlich, die durch die Produktion und Nutzung seines Produkts entstehen. Diese Verantwortung ist seit langem etabliert und gesetzlich festgeschrieben.
2. Ökonomische Verantwortung: Der Hersteller soll alle Kosten tragen, die für die Sammlung, Aufbereitung und Entsorgung seiner Altprodukte entstehen. Diese Kosten werden in der Regel durch Preisaufschläge oder besondere Recyclinggebühren auf den Konsumenten abgewälzt.
3. Physische Verantwortung: Der Hersteller wird am Management der Recycling- und Redistributionssysteme beteiligt, indem er entweder nur die dafür notwendige Infrastruktur und Technologie bereitstellt oder beauftragt oder tatsächlich auch in Rücknahmesystemen aktiv wird.
4. Informatorische Verantwortung: Der Hersteller ist verpflichtet, Informationen über sein Produkt zur Verfügung zu stellen, wodurch hochwertiges Recycling oder die Wieder- und Weiterverwendung von Produkten gefördert werden soll.
5. Materialverantwortung: Der Hersteller bleibt über die gesamte Nutzungsphase seines Produkts im Besitz der darin enthaltenen Wert- und Schadstoffe. Der Konsument erwirbt nur ein Nutzungsrecht, nicht aber das Recht, das Produkt nach der Nutzung als Abfall zu entsorgen. Grundlage für solche „Leasing-Modelle“ sind zu etablierende Produktrücknahmesysteme.

Tab. 46 gibt einen Überblick über unterschiedliche Instrumente zur Umsetzung der EPR.

Tab. 46: EPR-Umsetzung

Ansatz zur EPR-Umsetzung	Beispiele für mögliche Maßnahmen
Administrative Ansätze	Verbot gefährlicher Substanzen im Produkt, minimale Produkt-Standards, Deponierungsverbote, verpflichtende Rücknahmeprogramme, Vorgaben für Recyclingquoten
Ökonomische Anreiz-Instrumente	Material-Steuern, Subventionen für Recyclingsysteme und -technologien, produktspezifische Recyclinggebühren, Pfandsysteme,
Informatorische, freiwillige Ansätze	Labelling, Umweltberichte, Produktinformationen, „Codes of Conducts“ für Rücknahmesysteme, Angebot neuer Produktnutzungssysteme

Quelle: Eigene Darstellung nach Osibanjo/ Nhorom 2008

Innerhalb der erweiterten Herstellerverantwortung muss zwischen individuellen und kollektiven Ansätzen unterschieden werden. Während die individuelle Produzentenverantwortung (IPR) vor allem auf Veränderungen im Produktionsdesign abzielt, stellen

kollektive Ansätze eher auf sektorale Initiativen ab. Insofern schließen sich die Ansätze nicht gegenseitig aus, sondern sollten kombiniert betrachtet werden. Darüber hinaus sind gemäß der geteilten Produktverantwortung auch in Zukunft die öffentlich-rechtlichen Entsorgungsträger für die Sammlung und Erfassung der WEEE verantwortlich. Damit ist natürlich auch die Gestaltung des rechtlichen Rahmens ein entscheidender Faktor für die Unternehmen, ihre Produktverantwortung möglichst effizient wahrzunehmen.

Kommunikation der EPR durch die Hersteller und Netzbetreiber

Fast alle Hersteller von Elektrogeräten äußern sich auf ihren Webseiten mittlerweile zum Thema Rücknahme und Recycling ihrer Geräte, auch wenn schon hier erhebliche Unterschiede im Detaillierungsgrad ihres Selbstverständnisses und Commitments festzustellen sind. Einige Unternehmen wie Sony Ericsson oder Phillips äußern sich auch zum Thema Exporte in Entwicklungsländer und beteiligen sich an unterschiedlichen internationalen Initiativen zu diesem Thema.

Der EU-weit aktive Netzbetreiber Vodafone bekennt sich in seinem Corporate Responsibility Report ausdrücklich zu seiner Verantwortung auch für exportierte Handys und stellt fest: „Phones sold to customers in developing or middle-income countries eventually end up as waste. Most of these countries lack the infrastructure and skills to recycle or dispose of old mobile phones safely and may not want to prioritise resources to this task“ (vgl. FFTF 2007, 8).

Maßnahmen für eine verstärkte kollektive Produzentenverantwortung, die auf ein verstärktes Recycling von Mobiltelefonen und damit auch auf die Kreislaufführung von PGM abzielen, setzen in der Regel ein branchenweit koordiniertes Vorgehen voraus; vor allem muss sichergestellt sein, dass sich kein Hersteller durch ein Trittbrettfahrerverhalten einen Wettbewerbsvorteil sichern kann. Wie in Kapitel 4 gezeigt, deckt eine überschaubare Anzahl an Herstellern die jeweiligen Märkte für Handys, Fernseher und Monitore ab, so dass eine sektorweite Verständigung für Maßnahmen in diesem Bereich prinzipiell möglich sein sollte. Ein mögliches Vorbild könnte die freiwillige Selbstverpflichtung der Handyhersteller sein, sich auf einen gemeinsamen Standard für Ladegeräte zu einigen. Dadurch muss nicht für jedes Handy ein neues Ladegerät erworben werden, was insgesamt die Benutzerfreundlichkeit steigert und gleichzeitig die WEEE-Menge in der EU um einige tausend Tonnen verringern soll (vgl. EU 2009). Die Vereinbarung wurde von insgesamt 10 Unternehmen unterschrieben, allerdings erst auf erheblichen Druck der EU-Kommission, die angedroht hatte, sonst selbst auf dem Regulierungsweg tätig zu werden. Die Regelung ist so dynamisch angelegt worden, dass eine Festlegung auf eine bestimmte Technologie vermieden wurde und an zukünftige Ladetechnologien angepasst werden kann.

Internationale Dimension

EPR ist eine Methode, die prinzipiell auch geeignet sein kann, die Prinzipien einer nachhaltigen Entwicklung basierend auf dem Verursacherprinzip auch in den internationalen Handel zu integrieren – hierzu dürfte die finanzielle und physische Verantwortung für Produkte jedoch nicht bei Verlassen der Europäischen Union enden. Indem die Verantwortung bzw. die Kosten für die Entsorgung und das Recycling den Unternehmen übertragen werden, sollen Anreize in Richtung eines umweltfreundlicheren Designs und geschlossener Stoffkreisläufe gesetzt werden. EPR entspricht damit einem Verständnis von Umweltpolitik, der eher auf präventive Maßnahmen als auf End of Pipe setzt, nicht nur auf Abfallpolitik beschränkt ist, sondern einen lebenszyklusweiten Ansatz verfolgt und sich damit auch von klassischen Formen direkter Regulierung („command and control“) stärker auf ökonomische Anreize setzend und eher zielorientierten Richtung entwickelt, die kontinuierliche Anreize für bessere Produkte und Prozesse setzen will (vgl. van Rossem et al. 2006).

4.5.3 Allgemeiner Ansatz zur Substitution von Primär-PGM: Mindestvorgabe für Einsatz von Sekundär-PGM (mit Zertifikat)

Die Möglichkeiten zur Substitution von PGM im Bereich der Elektro- und Elektronikgüter durch andere Metalle sind äußerst begrenzt (vgl. Kap. 4.4.2). Daher soll ein möglicher Ansatz untersucht werden, Primär- verstärkt durch Sekundär-PGM zu ersetzen und so internationale PGM-Kreisläufe zu schließen, und zwar eine Vorgabe für den Einsatz von Sekundär-PGM für bestimmte Produkte (für das Beispiel Mobiltelefone vgl. Werland/ Jacob 2009).

Prinzip des Instruments

Das Instrument zielt sowohl auf die Steuerung des produktspezifischen (Primär-)Materialverbrauchs als auch auf die Verbesserung des Rücklaufs von Altgeräten in den Recyclingkreislauf. Es geht damit um die Initiierung von Innovationen in der Produktionskette von IKT-Produkten. Die Vorgabe von Mindeststandards für den Anteil an Sekundär-PGM führt zu einer direkten Wirkung auf den produktspezifischen (Primär-)Rohstoffverbrauch (wenn sie über dem bisherigen Anteil liegt). Darüber hinaus wird eine Nachfrage nach Sekundärmaterial geschaffen bzw. weiter erhöht. Damit wird auf die Stärkung von Marktstrukturen für den Handel mit Sekundärrohstoffen gezielt und ein Markt gestärkt, der bislang noch unter seinen Möglichkeiten bleibt. Durch eine höhere Nachfrage nach Recyclingmaterial können zudem finanzielle Potenziale zur Verbesserung bestehender und zu entwickelnder Behandlungs- und Recyclingtechnologien freigesetzt werden. Vor allem werden aber auch Anreize geschaffen, um Sammelsysteme aufzubauen. Plausibel wäre, dass durch die Verpflichtung eine Aufwertung gebrauchter Elektrogeräte erfolgt, so dass z.B. Hersteller die Rückgabe durch die Endnutzer honorieren, Pfandsysteme aufbauen etc.

Die vorgesehene Mindestquote für den Recyclat-Anteil für PGM in Produkten wirkt sowohl direkt als auch indirekt auf den Rohstoffverbrauch:

- Erstens kommt es durch Standardsetzung zu einer direkten produktspezifischen Einsparung des regulierten Primärmaterials. Dieses ordnungsrechtliche Instrument kann mit einer Marktzugangsregelung verknüpft werden: Ohne einen Nachweis über den Recyclatanteil dürften die Geräte dann in Deutschland (oder um Binnenmarktsverzerrungen zu vermeiden: in der EU) nicht verkauft werden (zu den juristischen Voraussetzungen für eine solche Regelung s. Werland/ Jacob 2009)
- Durch eine dynamische, im Zeitverlauf ansteigende Recyclatquote wird zweitens ein eigenes Interesse der Produzenten geweckt, die Recyclingquoten von IKT-Geräten zu steigern. Hohe Mindestquoten für Recyclatverwendung können dazu führen, dass ein Interesse der Hersteller an einem möglichst effektiven und effizienten Rücknahmesystem generiert wird, um die Versorgung mit kostengünstigem Material und die Quotenerreichung sicherzustellen.
- Als ein Nebeneffekt könnten Investitionen in technische und organisatorische Innovationen im Recyclingsektor wirtschaftlich tragfähig werden und damit die bisherigen Rückgewinnungs-Quoten erhöht werden.

Abschätzung der Wirksamkeit einer Quote für Sekundär-PGM

Abschätzungen zur Wirksamkeit dieses Instruments wurden in einer Vorstudie im Projekt MaRess, anhand dreier Szenarien entwickelt. Als Basis wird der derzeitige Stand angenommen, nachdem rund 20% der anfallenden kleinen Elektroaltgeräte separat eingesammelt und unter dem derzeitigen Stand der Behandlungs- und Recyclingtechnik verwertet werden (vgl. Jacob/ Werland 2009).

- In Szenario 1 wurde angenommen, dass zusätzlich 10% der momentan ungenutzten (gehorteten) Mobiltelefone entsorgt werden und dass die Hälfte des insgesamt entstehenden Altgeräteaufkommens separat gesammelt werden. Der technische Stand der Recyclingtechnologie wurde als konstant angenommen.
- Szenario 2 ging ebenfalls davon aus, dass zusätzlich 10% der ungenutzten Telefone entsorgt werden. Die Quote der separat gesammelten Altgeräte wurde auf 50% gesetzt und die Effizienz der Recyclingtechnologie in Bezug auf die Rückgewinnung um 10%-Punkte für alle Metalle erhöht.
- Szenario 3 legte eine Entsorgungsrate von 20% der momentan gehorteten Geräte an. Weiterhin wurden in diesem Szenario 80% aller Altgeräte getrennt gesammelt und die Recyclingtechnologie erhöht ihre Effizienzquote um 10% für alle Metalle.

Die Szenarienrechnung für das Fallbeispiel Mobiltelefone zeigt einen Anstieg der Metall-, also auch PGM-Rückgewinnung im den Faktor 6 im ersten Szenario, um den Faktor 7 in Szenario 2 sowie um den Faktor 17 im 3. Szenario.

Umsetzung der Sekundär-PGM-Quote durch ein Zertifikatsystem

Problematisch bzw. in der Umsetzung schwierig ist, dass Metallen nicht anzusehen ist, ob sie in der Primär- oder Sekundärproduktion gewonnen wurden. Konkrete Materialströme entlang der Produktionskette sind kaum nachvollziehbar. Um dieses Problem

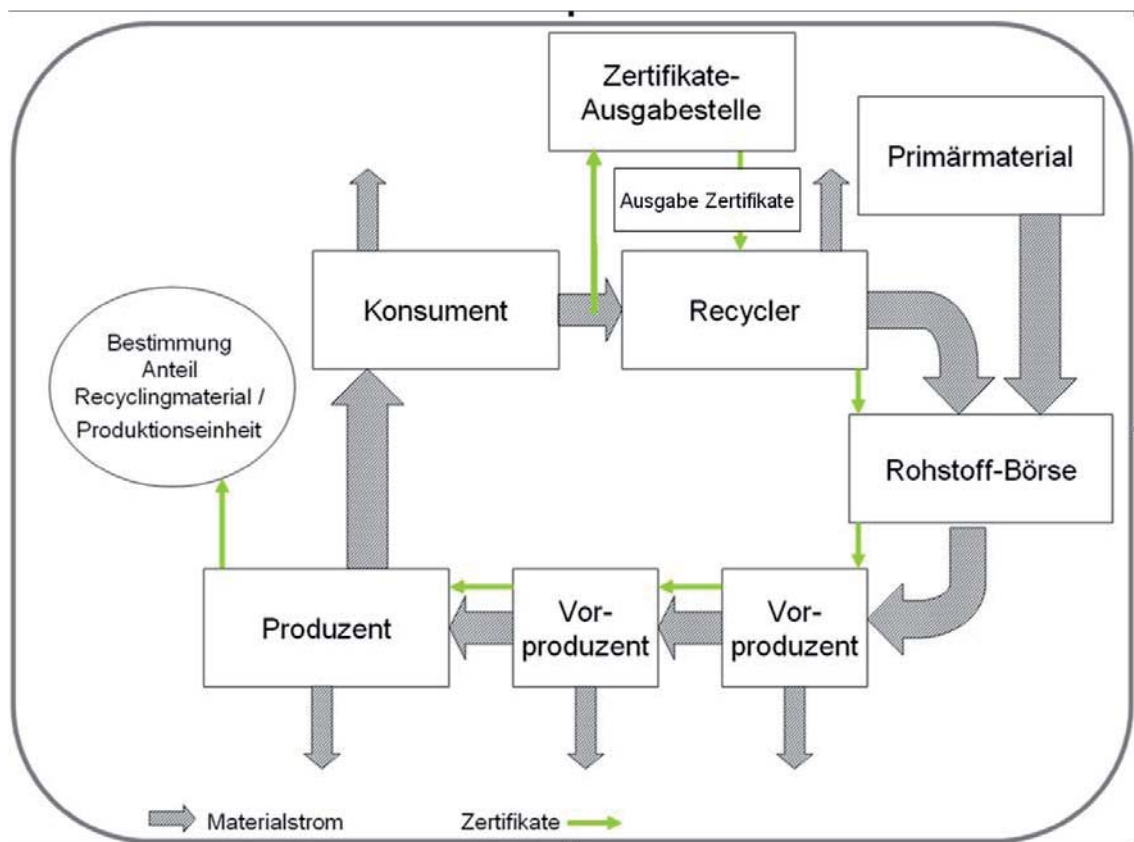
zu beheben, wurde daher im MaRess-Projekt ein Zertifikate-Ansatz entwickelt (vgl. Bleischwitz et al. 2009)

Der Einsatz von Sekundär-PGM in der Produktion wird durch Zertifikate belegt, die von einer zu gründenden Zertifikate-Ausgabestelle an Recyclingunternehmen herausgegeben werden, die sich bei dieser Stelle akkreditieren lassen müssen. Diese Zertifikate werden entlang der Produktionskette weitergegeben. Mit der Übergabe des Endprodukts an den Einzelhändler bzw. nach Ablauf der Berichtspflicht werden die Zertifikate von den Herstellern an die Regulierungsbehörde ausgehändigt.

Produzenten müssen für jeden Berichtszeitraum⁵⁷ und jede Produktlinie (Modell) nachweisen, dass sie bzw. die relevanten Vorproduzenten ihren Bedarf in diesem Fall an PGM mindestens zu einem bestimmten Prozentsatz aus Sekundärmaterial beziehen. Um die Entstehung neuer, ‚illegaler‘ Zertifikate entlang der Produktionskette zu verhindern, wird die Weitergabe der Zertifikate über ein Zertifikate-Konto organisiert. Das Kontensystem wird von der Regulierungsstelle verwaltet. Dadurch kann die Menge der auf dem Markt befindlichen Zertifikate mit der Menge der ausgegebenen und eingezogenen Zertifikate (d.h. der offiziell auf dem Markt befindlichen Zertifikatenumenge) abgeglichen werden.

⁵⁷ Um Synergien mit bestehenden Informationspflichten für Hersteller zu nutzen, bietet sich eine Orientierung an den bestehenden Berichtszeiträumen gegenüber der ear an.

Abb. 63: Konzept eines Zertifikatesystems für den Sekundärmetalleinsatz in Produkten



Quelle: Werland/ Jacob 2009

4.5.4 Konkrete Maßnahmenvorschläge für Mobiltelefone

4.5.4.1 Verbesserung der Sammelquoten für Mobiltelefone im Inland

Problembeschreibung

Wie in Kapitel 4 beschrieben, liegen die größten Potenziale zur Schließung von PGM-Kreisläufen bei Handys in einer Erhöhung der inländischen Sammelquoten. Das Beispiel der Schweiz mit einer Rücklaufquote von 15% zeigt, dass hier noch enorme Potentiale liegen, die Kreislaufführung für PGM zu verbessern.

Maßnahmenvorschlag

Da grundsätzlich ein Eigeninteresse der Herstellerindustrie an einer verbesserten Versorgung mit strategischen Metallen wie Indium und Palladium unterstellt werden kann und der Behandlungs- und Verwertungsprozess als solcher durch den hohen Gehalt an Edelmetallen auch weitgehend kostendeckend ist, sollten zunächst Ansätze be-

schrieben werden, in Kooperation mit den Herstellern, aber auch den Netzbetreibern – die ja auf die kostengünstige Versorgung mit Mobiltelefonen angewiesen sind - freiwillige Maßnahmen auf Seiten der Industrie zu unterstützen. Sollten diese Maßnahmen allerdings nicht den gewünschten Erfolg zeigen, könnte zusätzlich die Option eines Pfandsystems für Handys überprüft werden, siehe unten (Abschnitt „Alternative Handypfand“).

Gemeinsames Rücknahmesystem von Herstellern und Netzbetreibern

Um die Rücklaufquoten von Handys deutlich zu erhöhen, sollten sich die Hersteller/Importeure und Netzbetreiber in Kooperation mit den für die Sammlung nach ElektroG zuständigen Kommunen am Aufbau eines gemeinsamen Rücknahmesystems beteiligen⁵⁸. Ein erfolgreiches Vorbild für eine freiwillige Initiative in Bezug auf flächendeckende Rücknahmesysteme als Branchenlösung existiert seit 1999 in Australien. Dort konnte die jährliche Sammelmenge von 2002 bis 2009 von 2g pro Einwohner, was bereits über dem aktuellen deutschen Wert liegen würde, auf 5,6g/ EW gesteigert werden (vg. Beigl 2010, S. 504). Das System wird von der Australian Mobile Telecommunications Association (AMTA) betrieben, in der sowohl zehn Hersteller als auch sechs verschiedene Netzbetreiber engagiert sind – diese Kooperation ermöglicht ein abgestimmtes und effizientes Vorgehen und sollte daher auch für das deutsche Rücknahmesystem angestrebt werden. Die Kosten des Systems werden dort über eine Abgabe in Höhe von ca. 0,30 EUR finanziert, das für jedes auf den Markt kommende Mobilfunkgerät erhoben und von der AMTA verwaltet wird (vgl. AMTA 2009). Bei einer vergleichbaren Höhe in Deutschland würden sich auch bei einer vollständigen Umlage auf die Verkaufspreise die von den Herstellern und Betreibern befürchteten Effekte auf die Nachfrage in überschaubaren Grenzen halten.

Kernstück des australischen Systems sind 3.500 Abgabestellen bei Händlern und Reparaturzentren. Vor allem Sammelpunkte am Verkaufsort haben den Vorteil, dass sie dem Konsumenten bereits bekannt sind und mit Handys intuitiv in Verbindung gebracht werden. Die Kosten sind relativ gering, benötigt werden ein Sammelbehälter und eine Person, die sich für den Behälter verantwortlich erklärt; die wesentlich relevanten Kosten der Sammellogistik fallen bei einem, gemeinsamen System deutlich niedriger aus als bei der bisherigen Vielzahl an Sammelsystemen. Häufig mangelt es

⁵⁸ Angesichts der getroffenen Vereinbarungen zur Vereinheitlichung von Zubehör, vor allem der Ladegeräte für Mobilfunkgeräte scheint dessen Erfassung mittelfristig für den ReUse dieser Geräte nicht mehr zwingend notwendig. Eine Miterfassung weiterer Elektrokleingeräte wie MP3-Player wäre angesichts der auch für diese Geräte niedrigen Rücklaufquoten für den PGM-Kreislauf zwar wünschenswert, würde wahrscheinlich aber den Abstimmungsaufwand für die Verteilung der Finanzierungskosten deutlich erhöhen, so dass hiervon im ersten Schritt abgesehen werden sollte.

jedoch an erkennbaren Informationsangeboten für den Kunden, weil der Fokus im Laden eindeutig auf dem Verkauf neuer Geräte liegen soll. Als Unterstützung für die Einrichtung solcher Sammelstellen könnten den Shopbetreibern Poster und ähnliches Infomaterial bereit gestellt werden (vgl. MPPI 2009, 14). Die Rückgabebehälter sollten optisch einheitlich gestaltet sein, um einen hohen Wiedererkennungswert zu gewährleisten und gleichzeitig über die ökologischen Vorteile des Recyclings von Mobilfunkgeräten informieren.

Echte Verbesserungen könnten erreicht werden, wenn die Rückgabe der Handys als Service für den Kunden etabliert werden könnte. Um der Tatsache Rechnung zu tragen, dass selbst nicht mehr gebrauchsfähige Mobilfunkgeräte noch über einen Materialwert verfügen, könnten sowohl Netzbetreiber als auch Hersteller ihren Kunden spezifische Anreize bieten, die über das Umlagesystem finanziert würden: Preisnachlässe auf ein Neugerät oder zusätzliche Gratisdienstleistungen bei Abgabe eines ausrangierten Handys (unabhängig von seiner Funktionstüchtigkeit). Die EU hat ein Pilotprojekt zur Integrierten Produktpolitik (IPP) bei Handys gestartet, in dem die unterschiedlichen Möglichkeiten untersucht wurden, die Rückführung gebrauchter Handys in die Recycling-Strukturen zu verbessern. Ein viel versprechender Ansatz könnte demnach sein, beim Kauf eines Neugeräts Gutschriften in Form von Freiminuten oder Frei-SMS zu gewähren, wenn das alte Handy abgegeben wird (vgl. Lindholm et al. 2008, 19).

In einer australischen Kampagne wurde direkt an das ökologische Gewissen der Konsumenten appelliert: Für jedes abgegebene Handy hat sich der Netzbetreiber Mobilemuster verpflichtet, einen Baum zu pflanzen (vgl. Abb. 64).

Abb. 64: Plakatkampagne für Handyrücknahmesysteme in Australien



Quelle: Mobilemuster 2008

Auch die etablierten Systeme der kommunalen Sammlung von Elektroaltgeräten können hinsichtlich der Erfassung von Mobilfunkgeräten angepasst werden, z.B. sollte daher auch auf Wertstoffhöfen ein eigener Handy-Sammelbehälter eingerichtet werden. Ein weiteres, bereits etabliertes System der Handysammlung ist die Einschickung

per Post, wichtig ist ein zentraler vertrauenswürdiger Akteur, der die Geräte entgegennimmt und weiterverteilt.

Ziel des Sammelsystems muss es sein, eine Deponierung von Mobilfunkgeräten nach ihrer Nutzungsphase auszuschließen und sie stattdessen einer stofflichen Verwertung zuzuführen. In der Startphase des Systems ist daher zu überlegen, ob auf den Export von Geräten komplett verzichtet werden sollte, um eine vollständige Transparenz der Stoffflüsse zu gewährleisten. Grundsätzlich sollten jedoch alle Sammelssysteme darauf achten, dass die Handys nicht beschädigt werden, um die Demontage der Geräte nicht zu erschweren.

Die sammelnde Organisation sollte ein möglichst hohes Maß an Transparenz über die Produktströme gewährleisten, gerade wenn es sich um freiwillige Sammlungen handelt. Letzten Endes sind Sammelssysteme immer auch abhängig vom Vertrauen des Nutzers in das Sammelssystem. Ein zunehmend relevanteres Hemmnis bei der Sammlung von Mobilfunkgeräten ist die Sorge der Nutzer über den Verbleib ihrer privaten Informationen, die auf dem Gerät gespeichert sind (vgl. AMTA 2009, 14). Mit dem zunehmenden Anteil von Smartphone ist absehbar, dass der Schutz dieser Daten absolut gewährleistet sein muss.

Der wesentliche Vorteil des australischen Modells der AMTA, auf dem dieser Maßnahmenvorschlag basiert, gegenüber den bereits bestehenden Ansätzen in Deutschland ist vor allem in dem seit 1999 kontinuierlichen, zwischen den verschiedenen Herstellern und Netzbetreibern abgestimmten Vorgehen zu sehen, dass zu deutlich höheren Bekanntheitsgraden des Systems führt: Nach Angaben der AMTA liegt dies in Australien bei konstant 79% (vgl. AMTA 2009). Die bereits in Deutschland bestehenden Angebote sind bisher nur einem Bruchteil der Nutzer bekannt, hier wäre es aber vor allem die Aufgabe der Netzbetreiber, die über den direkten Kundenkontakt verfügen, diese Angebote zur verstärkten Kreislaufführung von Mobiltelefonen stärker in das öffentliche Bewusstsein zu rücken.

4.5.4.2 Alternative Maßnahme: Pfand auf Mobiltelefone

Um den Konsumenten einen zusätzlichen ökonomischen Anreiz zu bieten, sein ausgerangiertes Handy in die dafür vorgesehenen Redistributionssysteme zu geben, könnte beim Kauf eines Neu-Handys ein Pfand erhoben werden, der von den Herstellern in einen gemeinsamen Fond eingezahlt wird (dieser sollte möglichst von den Herstellern selbst verwaltet werden). Um das System einfach zu halten, sollte diese Regelung auch für Handys gelten, die vor der Pfandeinführung gekauft wurden. Das entstehende Defizit des Fonds müsste aus den Recyclingerlösen und durch die Industrie gegenfinanziert werden. Bei Abgabe eines alten Handys an einer der beteiligten Rückgabestellen würde dieser Pfand dann an den Letztbesitzer wieder ausgezahlt. In vielen Bereichen haben sich Pfandsysteme zur Erhöhung der Rücklaufquoten bewährt (z.B. beim Batteriepfand oder beim Flaschenpfand).

In der Praxis ergeben sich aber regelmäßig Widerstände, weil der Hersteller/ Netzbetreiber/ Handel kein Interesse an einem solchen System haben kann: Durch die höheren Preise inklusive des Pfands geht in der Regel die Nachfrage zurück, und der Netzbetreiber/ Hersteller muss die Kosten für die Sammelinfrastruktur und deren Betreuung tragen. Eine solche Regelung sollte daher möglichst gesetzlich verpflichtend gestaltet sein, möglich wäre aber auch der Industrie ein Rücklaufziel für Handys zu setzen, das innerhalb einer bestimmten Frist erreicht sein muss. Wird das Ziel aber verfehlt, wird automatisch ein Pfandsystem installiert. Es ergeben sich aber auch zwei potentielle Kompensations-Möglichkeiten: Entweder wird dem Hersteller erlaubt, das nicht eingelöste Pfand einzubehalten oder für die zurückgenommenen Mengen wird über den Fond eine Entschädigung gezahlt (vgl. Numata 2009, 199). Untersuchungen haben ergeben, dass das zweite System einer Fondlösung zwar mit mehr administrativem Aufwand verbunden ist, in Fällen mit hohen negativen Umwelt-Externalitäten wie im Fall der Handys und Monitore aber vorzuziehen ist (vgl. ebd., 207).

Ein mögliches internationales Vorbild für einen Handypfand ist Frankreich, wo aktuell die Einführung eines Pfandsystems für ausrangierte Mobiltelefone erwogen wird. Demnach soll beim Kauf des Handys eine Umweltgebühr fällig werden. Kunden bekommen das Geld erst zurück, wenn sie ihr altes Telefon wieder in den Laden bringen – statt es wegzuwerfen. Das französische Umweltministerium hat den großen Mobilfunkbetreibern zunächst eine freiwillige Lösung in Höhe von 5 Euro vorgeschlagen. Der französische Mobilfunkbetreiber Orange hatte unlängst beschlossen, seinen Kunden alte Handys abzukaufen. Das Unternehmen – eine Tochterfirma von France Télécom – will die Gebrauchthandys dann warten und je nach Modell für 25, 45 oder 95 Euro ohne Vertrag wieder verkaufen (vgl. Welt 2009).

Die Auswirkungen einer solchen verpflichtenden Pfandlösung auf die Rückgewinnung von PGM wird stark von der Höhe eines solchen Pfands abhängen. Aufgrund des hohen zu erwartenden bürokratischen Aufwands der Einrichtung und vor allem Kontrolle des Systems sowohl bei der zuständigen Verwaltung als auch bei der Industrie wäre die Hauptfunktion einer solchen Option jedoch, der Industrie einen echten ökonomischen Anreiz für ein freiwilliges System zu liefern („shadow of legislation“, vgl. Töller 2008).

4.5.4.3 Entwicklung von Wissenspartnerschaften („WEEE knowledge partnerships“) für Handys

Problembeschreibung

Angesichts der Tatsache, dass in Entwicklungs- und Schwellenländern aufgrund der wachsenden einheimischen Märkte auch unabhängig von legalen und illegalen Importen von Elektro- und Elektronikgeräten und -altgeräten steigende Mengen an Elektroaltgeräten anfallen, verlagern sich die Recyclingpotentiale, wie in Kapitel 4 beschrieben, zunehmend in Länder, in denen noch keine Strukturen für eine umweltgerechte Behandlung der Altgeräte bzw. Recyclinginfrastrukturen für die Rückgewinnung von

Edelmetallen aus Handys existieren. Damit gewinnt der Technologie- und Wissenstransfer in diese Länder zunehmend an Bedeutung. Yu et al. (2010) haben am Beispiel China aufgezeigt, dass gerade die Erfahrungen bei der Regulierung der WEEE-Problematik, wie sie in Deutschland schon seit längerem gemacht wurden, vor allem für Schwellenländer nützlich sein könnten, auch wenn sie natürlich an die Situation vor Ort angepasst werden müssen.

Bestehende Aktivitäten

Das Schweizer Staatssekretariat für Wirtschaft engagiert sich seit 2003 in Kooperation mit der Eidgenössischen Material- und Forschungsanstalt EMPA, der GTZ und UMICORE in einem Projekt „Wissenspartnerschaft im Elektroschrott Recycling“ für eine Verbesserung des WEEE-Recyclings in ausgewählten Importländern für EAG (z.B. China, Südafrika, Kolumbien und Indien). Ziel ist es, die Erfahrungen aus der Schweiz an die gegebenen Bedingungen vor Ort anzupassen und zu übertragen.

In Bangalore, das als Zentrum der IT-Industrie in Indien gilt, wurde durch das Projekt eine Kooperation mit Partnern vor Ort etabliert (vgl. Hagelüken/ Schluep 2009). Dort gibt es seit einiger Zeit drei formelle Recycler, die sich auf WEEE spezialisiert haben, aber in direkter Konkurrenz zum dominanten informellen Sektor stehen (der ca. 95% des Gesamtmarkts von ca. 400.000t pro Jahr abdeckt). Grundidee des **„Best of 2 world“-Ansatzes** ist es, die Stärken des informellen Netzwerks in Bangalore, das eine Sammelquote von über 90% erreicht, mit den im Vergleich zu den vor Ort praktizierten einfachen nasschemischen Verfahren ökologisch und ökonomisch deutlich überlegenen metallurgischen Recycling-Verfahren, die z.B. eine etwa vierfache Ausbeute an Edelmetallen ermöglichen (wie sie z.B. von UMICORE angewendet werden) zu verbinden. Ziel des Projekts ist es, die vielen kleinen informellen „backyard recycler“ in Rahmen einer formalisierten Kooperative zusammenzufassen, die sich auf die Sammlung, händische Zerlegung und Vorsortierung konzentriert. Untersuchungen in Kenia haben gezeigt, dass die wesentliche Quelle für Handyaltgeräte die Handyhändler darstellen, die einen wesentlichen Teil ihrer Einkünfte durch die Reparatur von Gebrauchtgernäten erzielen. Handys wird wie in Deutschland ein zu hoher Wert beigemessen, als dass sie als Müll entsorgt werden. Der „Handy-Müll“ besteht daher zu großen Teil aus Geräten, die nicht mehr repariert werden können und ausgeschlachtet wurden. Die Zahl der Reparatur-Shops in Kenia wird auf ca. 4000 geschätzt (vgl. ebd., 15). Die Betreiber haben in der Regel keinerlei Ausbildung und keine Erfahrung oder Kenntnisse mit dem Recycling von Handys.

Sobald eine bestimmte Menge an Leiterplatten aus Handys und anderen Elektrogeräten demontiert und gesammelt wurde, zahlt das Projekt eine Abschlagzahlung und übernimmt den Transport nach Europa. Durch die deutlich höheren Rückgewinnungsraten für Edelmetalle wie PGM und Gold (95% bei UMICORE in der Anlage in Hoboken, ca. 25% bei der vor Ort vom informellen Sektor praktizierten einfachen

Nasschemie mit Quecksilber und Zyanid) erhöht sich die Wertschöpfung aus den Elektroaltgeräten, die Arbeitsplätze bleiben erhalten und die Gesundheitsrisiken werden deutlich reduziert. Die Kooperative hat dabei die Wahl, ob sie lieber die Edelmetalle zurückbekommen und diese auf eigenes Risiko und Rechnung verkaufen will oder sich den Betrag auszahlen lassen will.

Ein strategisches Problem dieses Ansatzes, der auch von allen Partnern gesehen wird, ist, dass eine solche Struktur zusätzliche Anreize für die illegale Verbringung von WEEE setzen könnte. Das Projekt versucht daher vor allem auf die im Inland anfallenden WEEE abzielen, auch wenn diese Trennung nicht immer exakt nachvollzogen werden kann.

Maßnahmenvorschlag

Ein Ansatz ist daher ein Kooperationsmodell der in auszuwählenden Entwicklungsländern im Gebrauchtmärkte für Mobiltelefone aktiven Akteure (Sammlung, Demontage, Reparatur), die schon jetzt häufig über den Austausch von Ersatzteilen untereinander vernetzt sind. Die Shopbetreiber haben selber großes Interesse an Wissens- und Technologietransfer in diesem Bereich, da sie durch das Auftreten ausländischer, häufig chinesischer Aufkäufer erkannt haben, dass hier ein Marktpotential liegen könnte (vgl. Hagelüken/ Schluep 2009, 31). Nach Experteneinschätzungen ist ein solcher Ansatz allerdings nur erfolgversprechend, wenn sich die öffentlichen Stellen, nationale Netzbetreiber und Hersteller an der Entwicklung eines solchen Systems beteiligen. Da es sich um einen grauen bis illegalen Markt handelt, würde sonst keine ausreichende Zuverlässigkeit und Transparenz für eine solche Kooperation erreicht werden (vgl. ebd., S. 37). Funktion von BMU und UBA könnte dabei einerseits sein, in Deutschland aktive Handyhersteller und Netzbetreiber für ein finanzielles Engagement zu motivieren und zu koordinieren, andererseits Know-How über die umweltfreundliche Behandlung von Altgeräten zur Verfügung zu stellen. Gerade die Erfahrungen mit dem Aufbau des EAR in Deutschland könnten auch für Umweltbehörden in China und anderen Schwellenländern von besonderem Interesse sein. Die Probleme liegen dort ja häufig weniger in der rechtlichen Regulierung, als in deren effektiven Umsetzung. So ist in China am 1.1.2011 mit der „Regulierung zum Recycling und zur Entsorgung von Elektronikaltgeräten“ ein stark an das deutsche ElektroG angelehntes Gesetz in Kraft getreten (vgl. Yu et al. 2010, 983), es fehlt bisher aber noch an Ansätzen für ein effektives Monitoring, wie es in Deutschland aufgebaut wurde.

4.5.5 Konkrete Maßnahmen für PGM in Bildschirmen

Sowohl bei LCD- als auch vor allem bei CRT-Bildschirmen ist davon auszugehen, dass das Eigeninteresse der Industrie an einer verbesserten Kreislaufführung deutlich geringer sein dürfte als bei Handys. Von daher soll hier gezielt auf mögliche Verbesserungen im Vollzug bereits bestehender Exportverbote abgezielt sowie die rechtlichen Rahmenbedingungen der Sammlung und Behandlung hinsichtlich der Transparenz der

Stoffströme optimiert werden, wie sie in Kap. 4 als relevante Verluststellen identifiziert wurden.

4.5.5.1 Transparenz der Stoffströme in der Sammlung

Im Bereich Bildschirme soll näher untersucht werden, ob und wie sich das ElektroG auf das Recycling von PGM ausgewirkt hat. Es gibt unterschiedliche Hinweise (vgl. Schönekerl 2009, 91) darauf, dass die Verwertungspraxis und die Kontrolle seit Einführung gesunken ist. Gleichzeitig hat die Einführung der Flachbildschirme (bzw. ihr stark gesunkener Preis) den Austausch alter CRT-Geräte massiv beschleunigt, bei denen durch die fehlende Nachfrage nach Bleiglas auch die Verwertungsmöglichkeiten fehlen. Hier müssen ordnungsrechtliche Maßnahmen für ein verbessertes Monitoring ergriffen werden, um die Voraussetzungen für das Recycling der PGM-haltigen Platinen zu schaffen.

Problembeschreibung

a) Sammelqualität

Sowohl für eine hochwertige Verwertung als auch für die Wiederverwendung von gebrauchten Bildschirmen ist bereits die Erfassung entscheidend. Das ElektroG fordert in Paragraph 9, Absatz 5 die getrennte und bruch sichere Erfassung von Bildschirmen. Konkret heißt es in Anhang III, Nr. 7 des ElektroG, dass „Bildröhren [...] im Rahmen der Behandlung vorrangig in Schirm- und Konusglas zu trennen“ [sind]. Diese Trennung ist aus zwei Gründen zwingend:

- weil das Vorderglas nur auf diesem Weg von der umweltschädlichen Innenbeschichtung gereinigt werden kann,
- weil erst die Trennung von Vorderglas (es enthält als Zuschlag überwiegend Bariumoxyd) und Rückglas (es enthält überwiegend Bleioxyd) die Wiederverwertung der beiden Glassorten unterschiedlicher Zusammensetzung ermöglicht.

Nach den Regelungen des ElektroG müssen die Kommunen die Erfassung und Sortierung zwar finanzieren, sofern sie für die entsprechende Gruppen keine Eigenvermarktung angemeldet haben, bleiben die gesammelten Geräte jedoch im Eigentum der Hersteller. Dabei verursacht eine zerstörungsfreie Sammlung jedoch deutliche Mehrkosten im Vergleich zur üblichen Sammlung und Transport von Bildschirmen in offenen Abrollcontainern: Zusätzliches Personal wird benötigt, wenn die Geräte vorschriftsgemäß zum Transport vorbereitet und nicht wie vielerorts einfach in Sammelcontainer geworfen werden. Eine Demontage der Leiterplatten wird hierdurch erschwert, da die zerstörten Bildschirme nur unter erhöhter Vorsichtsmaßnahmen (Glasscherben, teilweise auch Quecksilber aus den Geräten) behandelt werden können.

Dieser zusätzliche Aufwand wird den Kommunen jedoch nicht entlohnt, daher fehlt für die Kommune ein wirksamer Anreiz, die Geräte bei der Sammlung schonend zu behandeln und so dafür zu sorgen, dass sie beim Verwerter in einem guten Zustand und nicht zerstört ankommen (vgl. Leonhardt 2007).

Auch die Logistiker, die durch die Hersteller (bzw. ear) mit der Abholung der Container beauftragt werden, sind in der Regel zumeist nicht in die spätere Behandlung oder Verwertung involviert. Damit besteht auch für sie weder ein Interesse daran, Kommunen auf die Wert erhaltende Sammlung hinzuweisen, noch für einen zerstörungsfreien Transport zu sorgen. Hier besteht Handlungsbedarf, die Rahmenbedingungen der Leistungen genau zu definieren, z.B. zerstörungsfreier Transport. Viele Logistiker nennen unter der Hand als Bedingung für eine Abholung, die Ladung abkippen zu dürfen (vgl. Schönekerl 2009). Andernfalls sei der Zeitaufwand für das Ausladen bei den am Markt heute erreichbaren Preisen nicht vertretbar. Der Erstbehandler findet in der Folge z.B. im Fall von Bildschirmen häufig nur Bruch vor (vgl. Abb. 65: Bildschirm-Sammlung in Containern). Solche Container mit abgekippten Bildschirmen einer hochwertigen Verwertung zuzuführen, ist angesichts der zu erzielenden Vergütungen und der Verletzungsgefahr für die Arbeiter nicht mehr rentable (den abgekippten Inhalt eines solchen Containers der Verwertung zuzuführen, erfordert etwa einen vollen Arbeitstag, vgl. DUH 2007)⁵⁹.

Abb. 65: Bildschirm-Sammlung in Containern



⁵⁹ Da zudem die Bildröhren in Regel bereits zerstört sind, ist es weder möglich kontrolliert Schadstoffe zu entnehmen, noch die Trennung der Gläser und damit die hochwertige Verwertung zu gewährleisten.

Quelle: www.duh.de

b) Monitoring

Entscheidende Voraussetzung zur Verbesserung der Sammelqualität wird eine erhöhte Transparenz entlang der gesammelten Kette der Erfassung und Verwertung sein. Als problematisch erweist sich, dass das ElektroG eine Dokumentation erst ab dem Erstbehandler vorsieht (vgl. DUH 2007). Es lässt sich also z.B. nicht nachvollziehen, ob ein Bruch durch die falsche Aufstellung, die falsche Befüllung der Sammelbehälter oder deren Transport zu verantworten ist. Je nach Ursache wären aber entweder die Kommune oder die mit dem An- und Abtransport beauftragten Logistiker verantwortlich. Auch für die Vollzugsbehörden sind diese Fragen aufgrund der Vielzahl der beteiligten Akteure häufig mit keinem zu vertretenden Aufwand zu klären. Die Aussetzung der Nachweispflicht für gefährliche Abfälle an der Schnittstelle zwischen öffentlichem Entsorgungsträger und Erstbehandler führt damit dazu, dass ein rechtskonformer Umgang mit diesen Abfällen häufig nicht mehr stattfindet (vgl. Schönekerl 2009, 91)

Maßnahmenvorschlag

1. Transparentes Monitoring der Bildschirme ab der Sammelstelle

Um die Voraussetzungen für eine Schließung der Stoffkreisläufe der in Bildschirmen enthaltenen PGM-haltigen Platinen zu schaffen, sollte bereits bei der Ersterfassung der Elektroaltgeräte ein transparentes Monitoring eingeführt werden, welche Geräte von wem von wo nach wo transportiert wurden. Es ist absolut notwendig, dass die gesammelten Mengen den jeweiligen kommunalen Sammelstellen zugeordnet werden können, da ansonsten für die Kommunen selber kaum ein Anreiz besteht, ordnungsgemäße Sammelstrukturen vorzuhalten. Hierbei sollten auch die zuständigen Vollzugsbehörden unbedingt eingebunden werden. Analog zum Maßnahmenvorschlag bei den Autokatalysatoren wäre eine weitergehende Option für eine optimierte Erfassung und der Geräte und dessen Monitoring auch die Einführung von RFID-Chips (vgl. Kuhnhenh et al. 2006). Vor allem bei Flachbildschirmen bestände hiermit die Möglichkeit, herstellereinspezifische Demontagehinweise direkt an den Behandler weiterzugeben

2. Aufwandsabhängige Staffelung der Garantien nach § 6(3) ElektroG

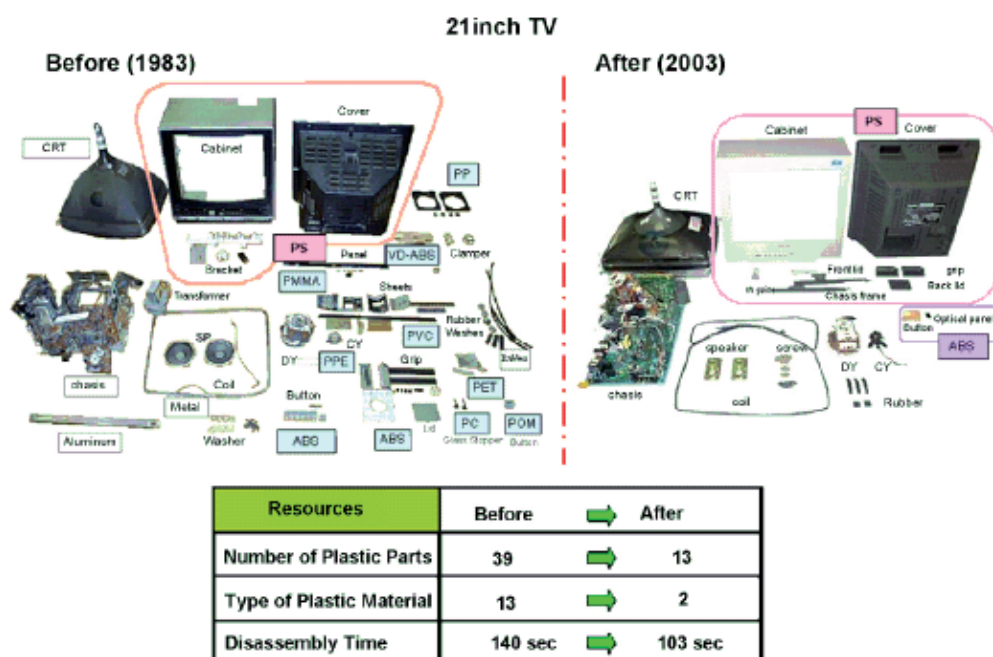
Solche Systeme existieren beispielsweise in Schweden, wo mit großem Erfolg aufwandsabhängige Recyclingversicherungen (Elektronikåtervinning i Sverige Ekonomisk Förening – EÅF) eingeführt wurden: Schweden hat mit 16kg pro Kopf die höchste WEEE-Sammelquote (vgl. Sander et al. 2007, 154). Ziel dieser Versicherung ist es, die Produzentenverantwortung auch im Fall einer Insolvenz sicherzustellen, die Prämien richten sich dabei zum einen nach der Anzahl der verkauften Geräte, zum anderen aber auch nach den Kosten, die das Gerät in der End of Life-Phase verursacht. Im

Gegensatz dazu dagegen bezahlen Hersteller in Deutschland Garantien und Verwertung ausschließlich massebezogen. Eine Übertragung des Systems auf Deutschland wäre problemlos möglich und würde z.B. bei Monitoren einen Impuls für eine einfachere Demontierbarkeit der PGM-haltigen Leiterplatten schaffen, indem die Gestaltung der Geräte hinsichtlich Recyclingfreundlichkeit in die Bemessung der Garantiebeträge bzw. der anteiligen Verwertungskosten einbezogen würde. Damit wäre durchaus ein Impuls geschaffen für eine intelligentere Gestaltung der Geräte.

Ein weiterer positiver Aspekt in Schweden ist, dass sämtliche Daten aus Behandlungs- und Verwertungsanlagen öffentlich zugänglich sind. Die Veröffentlichung dieser Daten ermöglicht allen Akteuren in diese Einblick zu nehmen, was den Vollzug unterstützt und gleichzeitig den Vollzugsaufwand mindert (vgl. Leonhardt 2007).

Die folgende Abbildung zeigt, dass die Potenziale für ein umwelt- und recyclingfreundliches Design durchaus vorhanden sind. Durch eine geringere Anzahl an Kunststoffteilen und -sorten wird eine Getrenntführung und damit hochwertige Verwertung des gesamten Geräts inklusive der Leiterplatten vereinfacht. Durch die Designumstellung konnte auch die Demontagezeit und damit die in der händischen Demontage entscheidenden Lohnkosten pro Stück um mehr als ein Drittel gesenkt werden.

Abb. 66: Demontagefreundliches Design bei CRT-Geräten am Beispiel der Kunststoffteile



Quelle: MoE/ METI 2006

3. Sperrmüllsammlung als Einzelabholungen

Sowohl um die Sammelqualität im Inland als auch um den illegalen Export von Altgeräten zu verhindern, sollte zudem möglichst schon an den unterschiedlichen Sammelquellen angesetzt werden (vgl. Sander/ Schilling 2009, 90). Dazu gehört z.B. die Umstellung der Sperrmüllsammelung in den Kommunen auf Einzelabholungen. Nach Angaben des VKS ist in 6 der größten deutschen Städte noch immer eine straßenweise Abholung des Sperrmülls üblich (vgl. VKS 2008), die es illegalen Akteuren sehr einfach macht, die Altgeräte entweder komplett an sich zu nehmen oder nur die werthaltigen Teile wie Kupferspulen zu entnehmen. Gute Erfahrungen wurden in einer Reihe von Städten mit mobilen Sammelstationen gemacht, die regelmäßig an zentralen Plätzen in den verschiedenen Stadtteilen ausrangierte Elektro- und Elektronikgeräte entgegennehmen.

Erfahrungen aus den Niederlanden zeigen allerdings auch, dass einige Städte es erlaubt oder zumindest toleriert haben, dass gewerbliche Müllsammler auf den Sammelstellen oder davor die werthaltigen Stücke aufgekauft haben (vgl. VROM 2005). Damit wird zwar einerseits der Re-Use von Gebrauchtgütern gefördert, gleichzeitig gehen aber Altgeräte oder Geräteteile in dunkle Kanäle, in denen keine ordnungsgemäße Verwertung stattfindet. Tendenziell sinkt der Wert des WEEE-Stroms und damit sinken auch die Anreize für ein hochwertiges Recycling.

4.5.5.2 Produktspezifische Regelungen für die Abgrenzung von Alt- und Gebrauchtgütern

Problembeschreibung

Ein relevanter Anteil der PGM-Verluste aus Monitoren rühren daher, dass Bildschirmaltgeräte, deklariert als Gebrauchtgüter in Länder ohne Recycling-Strukturen exportiert werden. Nach Einschätzung abfallrechtlicher Experten sind die „Hauptursachen dieser meist illegalen Exporte von Elektroaltgeräten (...) die rechtlich im Abfallverbringungsrecht und der WEEE-Richtlinie ungenaue bzw. schwierig vorzunehmende Abgrenzung zwischen Altgeräten und Gebrauchtgütern, ein kompliziertes Abfallverbringungsrecht, u.a. daraus resultierende erhebliche Vollzugsdefizite, unterschiedliche Zuständigkeiten sowie unzureichende Kontrollen durch nationale Behörden“ (Preller 2009, 541f.). Zu diesen schwierigen Abgrenzungsfragen kommt hinzu, dass es weder regional, national noch europaweit ein einheitliches Kontroll- und Überwachungssystem gibt, das einen effizienten Vollzug zur Verhinderung illegaler Abfallexporte ermöglichen würde (vgl. Preller 2009, 547). Zuständig sind jeweils die Landesbehörden, in denen der Transportvorgang tatsächlich beginnt (Art. 14 Abs. 1 AbfVerbrG), jede Landesbehörde praktiziert dabei bisher ihren eigenen Vollzug.

Die EU hat zu diesen Fragen einen Leitfaden entwickelt, der bisher nicht rechtsverbindlich ist, dies allerdings in modifizierter Form im Rahmen des WEEE-Recast werden soll. Bisher hat er nur wenig praktische Relevanz gehabt: „Dass diese Leitlinien

existieren, ist den Ländern bekannt, es hat sie nur niemand angewendet", kritisiert Dr. Andreas Jaron, Leiter des Referats für Grenzüberschreitende Verbringung von Abfällen im Bundesumweltministerium" (vgl. recyclingnews 2010⁶⁰). Nach der Revision für den Export von Altgeräten soll eine Beweislastumkehr gelten: Bei Kontrollen muss künftig der Abfallexporteur bzw. -besitzer nachweisen, dass es sich um gebrauchsfähige Geräte handelt und nicht um ein Altgerät. Dazu sieht die Leitlinie vor (Europäische Kommission 2007, 1f.):

„7. Macht der Besitzer geltend, er beabsichtige die Verbringung bzw. verbringe gebrauchte Elektro- und Elektronikgeräte und nicht Elektro- und Elektronik-Altgeräte, sollte als Beleg für diese Behauptung gegenüber einer Behörde auf deren Verlangen Folgendes bereitgestellt werden:

- a) eine Kopie der Rechnung und des Vertrags über die Veräußerung bzw. den Eigentumsübergang in Bezug auf Elektro- und Elektronikgeräte, worin festgestellt wird, dass die Geräte für die direkte Wiederverwendung vorgesehen und voll funktionsfähig sind,
- b) ein Beurteilungs-/Prüfnachweis in Form einer Kopie der Unterlagen (Prüfbescheinigung – Nachweis der Funktionsfähigkeit) zu jedem Packstück innerhalb der Sendung, sowie ein Protokoll mit allen Angaben zu den Unterlagen,
- c) eine Erklärung des Besitzers, der den Transport der Elektro- und Elektronikgeräte veranlasst, wonach es sich bei keinem Material und keinem der Geräte in der Sendung um Abfall gemäß Begriffsbestimmung in Artikel 1 Buchstabe a EG-Abfallrahmenrichtlinie handelt, und
- d) eine ausreichende Verpackung, um die Geräte während der Beförderung sowie des Ein- und Ausladens vor Beschädigung zu schützen.“

Die EU-Kommission hat im Rahmen ihres Änderungsvorschlags zur WEEE-Richtlinie einen Anhang I vorgelegt, der Mindestanforderungen für den Exporteur definiert. So soll z.B. eine Erklärung der haftpflichtigen Person zu ihrer Verantwortung vorgelegt werden. Hier besteht aber auch weiterhin Handlungsbedarf, bis die revidierte WEEE-Richtlinie umgesetzt ist..

Klar ist, dass eine rein nationale Regelung nur geringen Erfolg verspricht. Es ist absehbar, dass dies nur zu einer Verlagerung der Exporte auf Häfen in den Niederlanden oder Belgien führen würde. Zusätzliche Kapazitäten und ein weiter verstärkter Austausch zwischen den Mitgliedsstaaten wurden daher auch im IMPEL-Projekt (2008) als

⁶⁰ <http://www.interseroh-news.de/artikel.php?sid=4f2a1847dc51e31c7714b767337eaa4e&aid=357&p=1&a=1>

notwendige Maßnahmen beschrieben, um die illegale Abfallverbringung aus der EU einzudämmen.

Für die Importländer von Gebrauch- und Altgeräten wurde vorgeschlagen, zusätzlich zur Überprüfung der Gebrauchsfähigkeit ein Importverbot für Geräte einzuführen, die älter als drei Jahre sind (vgl. Osibanjo 2008). Hier stellt sich aber die Frage, wie diese Anforderungen angesichts der beschriebenen Korruptionsproblematik umgesetzt werden sollen. Dieses pauschale Vorgehen erscheint uns auch angesichts der sozialen Dimension von WEEE-Exporten (s.o.) nicht wirklich angemessen.

Maßnahmenvorschlag

1. Abgrenzung Neugeräte/ Gebrauchteräte in der Außenhandelsstatistik

Basierend auf den stichprobenartigen Untersuchungen zum Export von Elektroschrott über den Hamburger Hafen plädieren Buchert et al. (2007) für eine deutliche Verbesserung der Informations- und Datenlage als eine wesentliche Voraussetzung für die Eindämmung illegaler Exporte von WEEE. Neben der Verhinderung illegaler Exporte mit den beschriebenen katastrophalen Gefährdungen für Menschen und Umwelt in Afrika und Asien wären Informationen über die Exportstrukturen und die unterschiedlichen Akteure in den Wertschöpfungsketten auch für den Aufbau von internationalen Recyclingsystemen von großem Nutzen. Ein entscheidender Ansatz zur Steigerung der Transparenz der Massenströme wäre, analog zu Gebrauchtfahrzeugen auch für Elektro- und Elektronikgeräte eine getrennte Aufführung von Neu- und Gebrauchtwaren in den Außenhandelsstatistiken (zu den Details der Umsetzung vgl. Sander/ Schilling 2010). Sie schlagen auf Grundlage ihrer Erfahrungen bei der Auswertung der Zoll-datenbanken darüber hinaus vor, dass alle exportierten Waren unabhängig vom Anmeldeverfahren immer einer Wertkategorie zugeordnet werden sollen. Hier bestehen bisher erhebliche Unsicherheiten, weil sich Preisangaben bisher immer nur auf die gesamte Anmeldung beziehen.

2. Präzisierung der Verpackungsvorgaben für Gebrauchteräte

Ein pragmatischer Ansatz könnte sein, die Unterscheidung zwischen Alt- und Gebrauchter in einem ersten Schritt an einer ordnungsgemäßen Verpackung festzumachen. Hierzu sollte der Begriff der „angemessenen Verpackung“, wie er in Anhang I als Kriterium genannt ist, so zu präzisieren, dass er für die Vollzugsbehörden eindeutig und rechtssicher anzuwenden wäre. Der Export von Bildschirmen wäre dann verboten, wenn das Gerät nicht bruchsicher in einem entsprechenden Spezialkarton verpackt ist. Komplizierte Auseinandersetzungen, ob ein Gerät noch als funktionsfähig anzusehen ist oder eventuell nur zur Reparatur exportiert wird (wie sie aktuell im Anhang zum Entwurf der WEEE-Richtlinie diskutiert werden), würden sich damit auf Einzelfälle beschränken und damit dem begrenzten Kontrollpersonal ein deutlich effizienteres Vorgehen ermöglichen.

Die Regelung setzt an den bestehenden ökonomischen Anreizstrukturen an, wonach bisher auch Altgeräte exportiert werden, weil die Transportkosten niedriger liegen als die Kosten einer ordnungsgemäßen Verwertung im Inland. Mit den Kosten für die Verpackungen und dem Personalaufwand für ihre Bestückung soll sich ein Export nur noch dann rentieren, wenn im Bestimmungsland der Verkaufserlös für ein funktionierendes Gerät erzielt werden könnte. Dagegen würde der reine Export von Bildschirmen, um sie dort in unmittelbarer Nähe des Hafens illegal zu entsorgen, im Vergleich zu heute deutlich unattraktiver. Preisanfragen im Rahmen von MaRess haben ergeben, dass für geeignete Kartons etwa 3-4 Euro kalkuliert werden müssen, selbstverständlich können diese aber auch mehrfach genutzt werden. Entsprechende Checklisten für Monitore, die die tatsächliche Funktionsfähigkeit der Geräte am Zielort garantieren sollen existieren bereits und könnten als Basis für entsprechende produktspezifische Vorgaben (z.B. im Anhang I der WEEE-Richtlinie) dienen.

IBM-Hinweise zum Container-Transport für Monitore

- * Wickeln Sie den Monitor in Luftpolsterfolie ein
- * Legen Sie den Monitor mit der Seitenfront (nicht mit dem Sockel) nach unten in die Transportkiste
- * Legen Sie das Strom- und Signalkabel dazu. Achten Sie beim Packen darauf, dass der Bildschirm beim Transport nicht beschädigt werden kann
- * Vergewissern Sie sich, dass Sie auch den Sockel/schwenkbaren Standfuß eingepackt haben und der Sockel sicher befestigt ist
- * Achten Sie beim Palettieren darauf, dass nicht mehr als zwei Transportkisten übereinander liegen und eine angemessene Verpackung zwischen den Schichten ist
- * Wichtig ist, dass die Monitore nicht mit dem Bildschirm nach unten palettiert werden.

Quelle: Website IBM

In Japan sind speziell für die Sammlung von LCD-Geräten spezielle, stapelbare Sammelbehälter mit einem Volumen von etwa 1mx1mx2m vorgeschrieben, in denen jeweils ca. 20 Geräte bruch sicher transportiert werden können (vgl. Grieger 2010, S. 11). Durch ein solches verbindliches Verpackungssystem für Bildschirme und Monitore kann garantiert werden, dass die Geräte auch funktionsfähig am Bestimmungsort ankommen, wenn bestimmte Vorgaben eingehalten werden. Unter anderem sollten die Geräte unter allen Umständen in Kartons verpackt und fachmännisch palettiert werden. Nach Angaben von IBM kann man so in einem Standard-20'- Container ca. 75 Bildschirme oder Monitore unterbringen. Die Miete eines solchen Containers beträgt zwischen 3000 und 4000 Euro, je nach Beschaffenheit des Containers. Der Preis für das Verpackungsmaterial beläuft sich hierbei insgesamt auf ca. 250-300 Euro. Beim Verpacken und Palettieren sollte unter anderem darauf geachtet werden, dass die Bildschirme mit einem empfohlenen Abstand von ca. 8-10cm zur Behälterwand verstaut werden. Außerdem sollten die empfindlichen Monitore mit Luftpolsterfolie gesichert sein. Aus Sicherheitsgründen sollten die verpackten Geräte möglichst exakt auf die Paletten und max. 2 Kartons aufeinander gestapelt werden.

Zustände wie in Abb. 67 sollen somit verhindert werden. Durch die effizientere Verhinderung illegaler Exporte in Länder ohne entsprechende Recyclinginfrastrukturen kann gerade bei Bildschirmen das Recyclingpotenzial für PGM erhöht werden.

Abb. 67: Geöffneter Übersee-Container in Lagos mit exportierten Bildschirmen



Quelle: www.ban.org

Transformationsbedingungen und Perspektiven einer internationalen Rohstoffgovernance

Dieses Kapitel will darauf aufmerksam machen, dass sich die einzelnen Maßnahmen-vorschläge in den Handlungsfeldern in einem hochspezialisierten, internationalen Stoffstromregime bewegen, welches durch staatliche Umweltpolitik, Handelsprotektionismus und Marktdynamiken geprägt ist. Die Marktstrukturen sind vor allem durch Angebot und Nachfrage geprägt, gleichzeitig sind erhebliche Wachstumsdynamiken in einzelnen Ländern und Produktgruppen zu beobachten. Die Komplexität dieser Faktoren verlangt nach einem systemischen Steuerungsansatz, welche die Wechselwirkungen dieser Faktoren reflektiert und Ansatzpunkte für innovative Nischen identifiziert, welche dann als Vorbild für die weitere Entwicklung dienen können.

Bei der nachfolgenden Betrachtung wird auf Erkenntnisse der Transformationsforschung zurückgegriffen.⁶¹ Durch diesen Ansatz aus einer reflexiven Governance für eine nachhaltige Entwicklung (Voß, Bauknecht und Kemp 2006) wird der politische Handlungsraum neu strukturiert und es können Einschätzungen vorgenommen werden, mit welcher Geschwindigkeit sich realistischer Weise ein Transformationsprozess vollzieht. Unterschieden wird zwischen drei Ebenen (vgl. Geels 2005):

- Landscape-Level (übergeordnete, langfristige Trends wie demographischer Wandel, Globalisierung, Individualisierung und auch Ressourcenknappheit und Umwelt-risiken)

⁶¹ Vgl. u.a. Loorbach 2007, Rotmans/Kemp 2009, Loorbach 2010; Grin et al. 2010. Weitere Informationen zum Forschungs-Netzwerk „System Innovation and Transitions“ finden sich unter: <http://www.ksinetwork.nl/>

- Regime-Level: hier geht es um die konkreten Governance-Strukturen in einem Handlungsfeld, die auf das Handeln von Akteuren wirken (Gesetze, formale Regeln, informelle Standards, Interessen und Eigenlogiken)
- Nischen-/Experimente-Level: Hier werden konkrete Veränderungen erprobt.

4.6 Systemorientierte Beschreibung des Stoffstromregimes

Die nachfolgenden Betrachtungen beziehen sich im wesentlichen auf das Regime-Level in den Handlungsfeldern „Rückgewinnung von PGM aus Autokatalysatoren“ und „Elektro- und Elektronikprodukten“. Durch die Untersuchungen wurde deutlich, dass sich die Entscheidungen hinsichtlich der konkreten Organisation des Stoffstrommanagements häufig an der Schnittstelle zwischen abfallwirtschaftlicher Regulierung und Marktanreizen bewegen (vgl. hierzu auch Bergh 2004). Zunächst sind Autowracks und Elektroschrott – wenn sie in das Abfallregime eintreten – mit einem geringen Marktwert (kostenlose Annahme) versehen. Bereits die ersten Bearbeitungsschritte – Demontage und Separierung – führen jedoch dazu, dass die PGM-haltigen Komponenten (wie Katalysatoren und Platinen) zu handelbaren Gütern in der Rohstoffwirtschaft werden, die von nationalen und internationalen Metallhändlern nachgefragt werden. Damit begegnen sich in der Verwertungskette der PGM-haltigen Produkte zwei Grundprinzipien: die Entsorgung komplexer Produkte erfolgt zunächst nach den Vorgaben des Abfallrechts und spezifischer produktbezogener Regelungen hinsichtlich der Produzentenverantwortung. Hier dominiert der Grundgedanke des Umweltschutzes und der Ressourcenschonung. Werden aus dem Abfall wertstoffhaltige Bauteile separiert, so dominieren für deren Wiederverwendung oder Verwertung Marktpreise und der Wettbewerb in internationalen Handelsstrukturen bestimmt das Handeln der Akteure.

Da ein relevanter PGM-Strom aus den Bereichen Autokatalysatoren und Elektrogeräten den EU-Raum verlässt, muss bei allen Maßnahmenvorschlägen die internationale Dimension beachtet werden. Die Systeme des PGM-Recyclings sind auf der internationalen Ebene durch offene Märkte gekennzeichnet. Allerdings kommen in der Frage der Steuerung dieser Stoffströme noch einmal erhebliche nationale Interessen ins Spiel, wenn es darum geht, sich die Sekundärrohstoff-Potenziale zu sichern. Vereinzelt ist zu beobachten, dass aus Gründen der Rohstoffsicherung einige Länder protektionistische Maßnahmen ergriffen haben. So ist z.B. Russland dazu übergegangen, einige Sekundärrohstoffe mit Exportzöllen zu belegen. In diesem Kontext bewegen sich die umweltpolitischen Vorschläge zur Vermeidung von Rohstoffverlusten immer im Spannungsfeld von „Wettbewerbskonformität“ und „Protektionismus“. Zielkonflikte im WTO-Regime sind hierbei eher die Regel als die Ausnahme.

Auf der mikropolitischen Ebene umfasst das marktorientierte Stoffstrommanagement mit PGM mehrere Bearbeitungsstufen. Die Akteursketten sind im internationalen Maßstab nicht transparent, das Wissen um die zum Teil dubiosen und illegalen Wege, die das PGM nimmt, ist Teil des gut gehüteten Branchen-Knowhows, weil dieses Wissen

Wettbewerbsvorteile verschafft. Die Demontagebetriebe entscheiden hier als erste, was mit den demontierten Produkten zu geschehen hat, in dem Sie an bestimmte Händler verkaufen. In dieser Stufe ist es noch möglich, durch abfallrechtliche Maßnahmen eine verbesserte Stoffstromsteuerung zu erwirken, in dem beispielsweise bestimmte Anforderungen an Lagerung und Transport festgelegt werden. Dies scheitert im außereuropäischen Raum an fehlenden staatlichen Vorgaben. Insofern Handeln in diesen schwach regulierten Regime die Mehrzahl der Akteure rein egoistisch und externalisieren möglich Kosten an die Gesellschaft und die Umwelt, ohne hierfür belangt zu werden.

Aber auch in einem 'starken, geordneten Abfallregime (wie in Deutschland) sind im Falle des PGM-Stoffstrommanagements keine räumlichen und technischen Verwertungsoptionen vorgegeben. Die Bestimmungen des Abfallrechtes in Deutschland sind hier zu unspezifisch, um eine steuernde Wirkung im PGM-Stoffstrommanagement entfalten zu können. Dies führt insbesondere im Recycling von Konsumgütern dazu, dass das PGM-Recycling in einem offenen System stattfindet, welches ausschließlich nach den Regeln des Marktes funktioniert. Gleichzeitig sind die vertraglichen Bindungen zwischen den Akteuren schwach entwickelt, langfristige, vertrauensvolle Geschäftsbeziehungen eher selten. Aus ökonomischer Sicht lässt sich feststellen, dass in den Stufen Sammlung, Demontage/Zerlegung und Komponentenseparierung die Kosten (vor allem Arbeitskosten) eine bedeutende Rolle spielen und in der Phase der rohstofflichen Rückgewinnung die Investitions- und Unterhaltskosten für die jeweilige Anlage enorm sind. Die ersten Stufen der Bearbeitung (Sammlung, Sortierung) sind deutlich weniger kapitalintensiv als die Bearbeitungsstufe des stofflichen Recyclings in sog. Integrated Smelters. Um mit pyrometallurgischen Technologien PGM zurück zu gewinnen, bedarf es sehr anspruchsvoller Technologien und hochqualifizierter, spezialisierter Belegschaften. Aus diesen Bedingungen resultieren unterschiedliche Eigenlogiken der Akteure, die nicht miteinander kompatibel sind.

Aus innovationstheoretischer Sicht (Geels 2004) steht die Erschließung der PGM-Potenziale in einem Spannungsfeld von Investitionskosten für den Einsatz der Besten Verfügbaren Technik (BTV) und den damit verbundenen strategischen Vorteilen von (nachhaltigkeitsorientierten) first movers (vgl. de Bruijn/Norberg-Bohm 2005) bzw. lead markets (z.B. diejenigen Akteure, die sich derzeit auf den osteuropäischen Fachmessen engagieren und treffen) auf der einen Seite und business-as-usual-Praktiken mit geringeren Kosten, aber deutlich höheren Verlustrisiken auf der anderen Seite. Um den Innovationspfad für die Beste Verfügbare Technik zu stärken, bedarf es auch ökonomischer Förderung, der Unterstützung von Modellprojekten und eines gezielten Technologietransfers und Erfahrungsaustausches zwischen den Industrieländern und den weniger entwickelten, aber schnell wachsenden Volkswirtschaften.

Die Voraussetzungen für eine hochwertige rohstoffliche Zurückgewinnung des Materials sind bisher nur in wenigen, hochindustrialisierten Ländern vorhanden. Die notwendigen Investitionen konzentrieren sich auf die rohstoffliche Rückgewinnung durch international tätigen Großunternehmen, die eng mit den der Automobilindustrie und der

Elektroindustrie kooperieren. Diese Großunternehmen wie Umicore und Johnsson Matthey haben eine Markt beherrschende Stellung und könnten daher die sekundären Vorlieferketten in entscheidender Weise beeinflussen. Sie tun dies auch, in dem sie auch in den Zielländern gebrauchter Konsumgüter versuchen, eigenständige Redistributionsstrukturen aufzubauen. Allerdings können diese Strukturen nur in einem Umfeld funktionieren, in dem von staatlichen Stellen formulierte Regeln eingehalten werden. Aufgrund der erheblichen Vollzugsdefizite in außereuropäischen Zielländern der Exporte entsteht eine erhebliche Unsicherheit, ob eine solche Investition lohnt oder ob man nicht darauf vertrauen sollte, dass auf dubiosen Wegen das Material doch wieder in der integrierten Edelmetallhütte landet, da insgesamt ein großer Nachfragesog besteht.

Diese Situationsbeschreibung von Randbedingungen und Eigenlogiken macht auch deutlich, wie komplex die Aufgabenstellung ist, im internationalen PGM-Stoffstrommanagement Ziele einer geordneten und umweltschonenden Stoffstromsteuerung durchzusetzen. Von daher halten wir es für notwendig, in diesem Regime nicht nur ordnungsrechtlich und umweltbezogen zu argumentieren sondern insbesondere die ökonomischen Vorteile eines nachhaltigen Stoffstrommanagements herauszustellen. Diese sehen wir in folgenden Punkten:

- Mit den PGM aus sekundären Quellen wird auch für die PGM nachfragenden Industrien (Automobilindustrie, Hersteller von Konsumelektronik) eine zweite Bezugsquelle geschaffen und damit auch die Abhängigkeit von den wenigen Miningesellschaften in der Welt, welche Platingruppenmetalle direkt gewinnen, gemindert
- Aus der Perspektive eines gesicherten Inputs und der damit verbundenen Skalenerträge haben die Refiner ein Interesse daran, in der sekundären Verwertungskette systematisch alle Ineffizienten zu beseitigen, vor allem in den Konsum bezogenen Bereichen Anreiz orientierte Rücknahmesysteme aufzubauen.⁶²

Auch aus der Perspektive der nationalen Rohstoffsicherung Deutschlands ist die Erschließung komparativer Kostenvorteile durch die unterschiedliche Regulationsniveaus zwischen den Ländern keine tragfähige Strategie, da die Kostenvorteile durch eine mindere Qualität des gewonnenen Materials wieder aufgehoben wird. Gleichzeitig geht der direkte Zugriff der nationalen Recyclingwirtschaft auf das Material verloren. Der fehlende Ordnungsrahmen in den Zielländern der WEE-Stoffströme führt auch dazu, dass hier kaum verlässliche Partner zu finden sind, um demontierte Teile wieder zurückzukaufen.

⁶² So hat Hagelüken, als Vertreter von UMICORE, sich immer wieder kritisch zu bestehenden Vollzugsdefiziten geäußert.

Diese komplexe Ausgangslage verlangt nach integrierten Zielbildungsprozessen zwischen staatlichen und privaten Akteuren und neuartigen Governancestrukturen (vgl. Bringezu/Bleischwitz 2009; Bleischwitz 2007) und nach politischen Initiativen auf internationaler Ebene. Im Bereich der Mikropolitik sollten trotz der aufgezeigten Eigenlogiken zwischen unterschiedlichen Akteuren in den sekundären PGM-Ketten stabile Kooperationsbeziehungen aufgebaut werden, wobei den Refinern eine Schlüsselrolle zukommt. Hiermit verbundene Netzwerkaktivitäten, an denen sich auch öffentliche Stellen beteiligen sollten, können zur Verständigung über die Innovationsrichtung und zur Überwindung von Informationsasymmetrien beitragen.

Vor diesem Hintergrund ist die Vorstellung nicht mehr haltbar, das PGM-Stoffstrommanagement könnte allein mit den Instrumenten des nationalen und europäischen Abfallrechts und durch den hohen Marktwert ausreichend gesteuert werden. Notwendig ist eine am Markt ausgerichtete, integrierte europäische Ressourcenpolitik die durch eine stoffbezogene Umweltpolitik (SRU 2005) und neue Strategien einer internationalen Rohstoffgovernance flankiert wird. Gerade auf internationaler Ebene können entsprechende Vereinbarungen und Commitments zu einer Senkung von Transaktionskosten führen und systemische Innovationen ermöglichen, die mit Hilfe neuer Kooperationen zwischen Stakeholdern, Industrie und öffentlichen Stellen umgesetzt werden. Im Rahmen einer solchen Strategie sehen wir folgende Maßnahmen als prioritär an.

4.7 Prioritäre Maßnahmen für einen Systemwandel

4.7.1 Durchsetzung von einheitlichen Qualitätsstandards in internationalen Wertschöpfungsketten für alle Verwertungsstufen der PGM-Rückgewinnung

Die Rücknahme- bzw. Rückgabesysteme müssen so organisiert werden, dass sie auf einen bestimmten rohstofflichen Verwertungspfad (z.B. hochwertige Edelmetallrückgewinnung) orientiert werden. Dies muss bei der Erfassung einzelner Komponenten und Produktgruppen beginnen, in dem ökonomische Anreize (Linscheidt 1998) und Qualitätssicherungssysteme etabliert werden, um einen möglichst hohen Prozentsatz der enthaltenen Sekundärrohstoffe abzuschöpfen. Weder das Altfahrzeuggesetz noch das Elektrogesetz bietet hierfür derzeit einen geeigneten Rahmen. Die Produktverantwortung müsste an geeigneter Stelle dieser Gesetze durch eine Materialverantwortung ergänzt werden, die zumindest beinhaltet, dass die Edelmetallkreisläufe, welche durch komplexe Produkte entstehen, über alle Stufen der Verwertung dokumentiert werden.

In den internationalen Wertschöpfungsketten der Sekundärrohstoffwirtschaft muss aber gleichzeitig auch eine geteilte Verantwortung etabliert werden, d.h. es muss auf den jeweiligen Verarbeitungsstufen sichergestellt werden, dass das PGM-Recycling nach dem besten verfügbaren Stand der Technik erfolgt. Eine solche Regelung sollte im Sinne einer Vorwärts-Strategie durch die führenden Refining-Unternehmen verfolgt

werden, da sie von der Qualitätssicherung direkt profitieren, in dem sie besseres und unter Umständen auch mehr Material geliefert bekommen. Ggf. könnte eine solche Strategie durch einen Investitionsfond unterstützt werden, der kleinere und mittlere Unternehmen bei der Investition in neue Sammelsysteme und Anlagen unterstützt.

4.7.2 Verschärfung der Dokumentationspflichten bei der Ausfuhr gebrauchter Technologiegüter (insbesondere für den Handel)

Durch eine solche Dokumentationspflicht könnte auch ein wenig Licht in die Handelspraktiken gebracht werden und insgesamt die bisherige Praxis eingegrenzt werden, den Materialverkauf über Bargeschäfte abzuwickeln, die in keiner Steuererklärung erscheinen. Unsere Fallstudien haben ergeben, dass diese sog. grauen Märkte ein Grund dafür sind, dass das PGM-Recycling statistisch nicht erfasst wird, obwohl entsprechende Aktivitäten stattfinden.

4.7.3 Klare Kriterien für den Export von gebrauchten Konsumgütern außerhalb der EU und deren Überprüfung durch die Zollbehörden

Um den Input in eine hochwertige Verwertung zu sichern, bedarf es innerhalb der EU einer abgestimmten Politik für den Export von Altgeräten und Altfahrzeugen, mit dem Ziel, eine verdeckte Entsorgung in einem außereuropäisches Drittland zu verhindern. „An die Ausfuhr von gebrauchten Geräten und Gebrauchtfahrzeugen sind daher Anforderungen zu stellen, die sicherstellen, dass der Export nicht als eine kostengünstige Variante zur Umgehung der Produktverantwortung genutzt wird“ (SRU 2008, 734). Hierzu gehört nach Auffassung des SRU (ebd.) vor allem Ableitung von Mindestqualitätskriterien für Exportfahrzeuge in Anlehnung an die Anlaufstellenleitlinien für den Export von gebrauchten Elektrogeräten sowie die Unterstützung des Aufbaus eines flächendeckenden Importreglements in den Empfängerstaaten und gleichzeitig eine Anwendung dieses Reglements vor Verlassen des Exportlandes.

Ein weiterer Ansatzpunkt könnte hier z.B. verschärfte Regelungen für den Export von Schwermetallen und Gefahrstoffen sein oder zusätzliche Regelungen, wie und mit welcher Art von Verpackung die Altgeräte zu sichern sind. Insbesondere im Bereich der Elektronik-Güter sollte der gemischte Sammeltransport per Container ausgeschlossen werden. Durch derartige Maßnahmen kann insbesondere die Ausfuhr gebrauchter Computer und Bildschirme unterbunden werden, die in Wirklichkeit auf diesem Wege einer Billigentsorgung zugeführt werden sollen.

Um diese Kriterien wirksam werden zu lassen, müssen die Mitarbeiter und Mitarbeiterinnen in den Zollbehörden qualifiziert werden und entsprechende Mittel für diese zusätzlichen Aufgaben bereitgestellt werden.

4.7.4 Vertraglich abgesicherte Standards in der Recyclingkette

Im Rahmen des MaRes-Projekts wurde im AP mit dem Covenant ein konkreter Umsetzungsvorschlag entwickelt worden (vgl. Wilts et al. 2010). Der zentrale Ansatz dieses Anreizmechanismus lautet, dass Automobilhersteller (oder andere Wirtschaftszweige) und ihre Zulieferer, Recyclingindustrie sowie die zuständigen öffentlichen Stellen in den Export- und Zielländern einen privatrechtlichen Vertrag aushandeln, der langfristige Ziele zur Steigerung der Ressourcenproduktivität durch ein hochwertiges Recycling von Altfahrzeugen festlegen. In einem solchen Covenant werden sowohl die unterschiedlichen Verantwortlichkeiten der Akteure als auch Instrumente zur ihrer Operationalisierung, Umsetzung und Evaluation definiert. Die Vertragsparteien, Industrie-Unternehmen oder ihre Verbände, verpflichten sich auf ambitionierte Ressourcenschutzziele, die Staaten garantieren für die Vertragslaufzeit stabile und fördernde Rahmenbedingungen. Im Gegensatz zu deutlich unverbindlicheren freiwilligen Vereinbarungen ist der Covenant prinzipiell auch vor Zivilgerichten einklagbar; gleichzeitig sind im Vertrag aber auch wirksame Verfahren zur Streitbeilegung und Sanktionsmöglichkeiten vorgesehen, wenn Vertragspartner ihren Pflichten nicht nachkommen.

Es soll ausdrücklich hervorgehoben werden, dass mit diesen Vorschlägen sowohl umweltpolitische und als auch volkswirtschaftliche Ziele erfüllt werden können. Das vorrangige umweltpolitische Ziel der Ressourcenschonung und das volkswirtschaftliche Interesse an einer ausreichenden, langfristig sicheren Versorgung mit Rohstoffen sollten zu abgestimmten Aktivitäten führen, um die nationalen und internationalen Recyclingsysteme effizienter zu gestalten. Diese Zielkongruenz prägt auch die Rohstoffstrategie der Bundesregierung, in der der Sekundärrohstoffwirtschaft eine zunehmende Bedeutung als Rohstofflieferant attestiert wird (Bundesregierung 2007).

Für eine europäische Plattform, auf der umweltpolitische Fragen und Fragen der Rohstoffsicherung integriert behandelt werden, sollte die Europäische Kommission eine Plattform aufbauen und als neutraler Vermittler unterschiedlicher Interessen auftreten. Ein offenes Problem solcher Informationsnetzwerke ist der Übergang vom unverbindlichen Erfahrungsaustausch zu mehr oder minder verbindlichen Verabredungen (siehe hierzu auch die Aktivitäten des European Round Table on Sustainable Platinum Group Metals⁶³). Der Aufbau von Strukturen zur Qualitätssicherung in der Wertschöpfungskette muss im wesentlichen durch die Industrie selbst erfolgen. Hierbei sollten auch die bestehenden Verbandsstrukturen auf europäischer Ebene einbezogen werden. Der Erfolg solcher Netzwerke hängt unserer Einschätzung nach von einem zielgerichteten

⁶³ „The Roundtable on Sustainable Production and Use of Platinum Group Metals“ ist eine Initiative niederländischer Berater (Milieucontact International, Amsterdam und Dr. Reinier de Man, sustainable business development, Leiden,) Seine Ziele sind Erfahrungsaustausch und die Anregung von Kooperation zwischen unterschiedliche Stakeholdern. Die Plattform wurde durch das niederländische Ministerium für „Housing, Spatial Planning and the Environment“ gefördert.

Agenda-Setting, einer Einführung des Themas und der fachlichen Einbindung der Experten aus verschiedenen Ländern ab. So sollten beispielsweise die Probleme der Kreislaufführung und des Recyclings mit einem anderen Expertenkreis besprochen werden, als die Probleme, die in der Rohstoffversorgung existieren.

Vorbild hierfür könnte die bereits existierende Plattform „FICCI Environment Conclave“ sein, die auf den indischen Markt ausgerichtet ist.⁶⁴ Diese Plattform beinhaltet u.a. ein sektorales Forum für Entsorgungsprobleme in Industriebranchen sowie ein Netzwerk für alle Stakeholder in den verschiedenen Wertschöpfungsketten des Abfallmanagements. Die geeignete Organisationsform hierfür wären unterschiedliche Modelle der Public-Private-Partnership.

Die aktuelle Diskussion um Rohstoffe und Zukunftstechnologien hat inzwischen in Deutschland und Europa begonnen, das Thema Rückgewinnung von PGM in Autoabgaskatalysatoren und Elektrogeräten muss in diesem Zusammenhang unbedingt weiterhin auf die Agenda gesetzt werden.

4.8 Weiterer Forschungsbedarf

Ein erheblicher Forschungsbedarf ergibt sich vor allem hinsichtlich länderbezogener Fallstudien, die entlang produkt- bzw. stoffbezogene Spezifikation durchgeführt werden sollten. Die Ergebnisse sollten auch in der nationalen Nachhaltigkeitsstrategie Berücksichtigung finden. Insbesondere sollten die derzeit praktizierten Arbeitsteilungen im internationalen Recycling unter dem Aspekt der Umweltgerechtigkeit vertiefend analysiert werden (vgl. Wuppertal Institut 2007).

Das akteursbasierte Forschungsdesign dieser Studie hat sich bewährt. Durch Interviews und den Fachworkshop konnten wichtige Vertreter der Industrie und Experten mit ihrem Fachwissen eingebunden werden. Allerdings ist für weitere Forschungsvorhaben anzuraten, das Forschungsdesign etwas weiter zu fassen, so dass eine tiefergehende empirische Analyse möglich ist. Insbesondere die nachfolgenden Punkte sind alleine über die Auswertung sekundärer Quellen nicht zu erschließen.

- Die konkrete Ausprägung unterschiedlicher nationaler Regulationsregime in der Abfallwirtschaft und der Ressourcenpolitik, einschl. deren Vollzug
- Die tatsächliche Umsetzung gesetzlicher Vorgaben, internationaler Abkommen und bilateraler Vereinbarungen
- Die Praktiken in so genannten Grauen Märkten

⁶⁴ <http://www.ficci.com/fec09/aboutconclave.htm>

- Die Berücksichtigung der Entwicklungsunterschiede und der damit verbundenen internationalen Arbeitsteilung in den verschiedenen Bearbeitungsstufen
- Handlungslogiken, Interessenlagen, Gestaltungskompetenzen in den Recyclingketten
- Die Bereitschaft der Akteure, realitätstüchtige und konsistente Strategien/Pfaden zur effizienten Rückgewinnung von sekundären Stoffströmen mitzutragen.

5 Zusammenfassung

Der Einsatz von Platingruppenmetallen (PGM) mit den Hauptvertretern Platin, Palladium und Rhodium in technologieorientierten Anwendungen nimmt weltweit weiter zu. Treibende Faktoren sind die wachsende Nachfrage aus der Industrie, insbesondere aus den Anwendungsbereichen Autoabgaskatalysatoren und der Konsumgüterelektronik.

Beispiel Autoabgaskatalysatoren

Knapp 50 Prozent der (Primär- und Sekundär-)Produktion von Platin, Palladium und Rhodium finden Verwendung in Autoabgaskatalysatoren. Aufgrund des enormen Wachstums der Fahrzeugbestände insbesondere in den großen Schwellenländern Brasilien, Russland, Indien und China wird die Nachfrage nach PGM weiter ansteigen. Eine besonderes Merkmal der Nachfragestruktur ist es, dass sich in den letzten Jahren die Anteile zwischen Platin und dem kostengünstigeren Palladium erheblich verschoben haben.⁶⁵

Im Jahr 2008 wurden in Deutschland nur ca. 15 % der ca. 3 Millionen endgültig stillgelegten Fahrzeugen verwertet, 8 % gingen als Gebrauchtwagen direkt in Nicht-EU-Staaten⁶⁶, 50 % wurden als Gebrauchtwagen in EU-Staaten und zwar überwiegend in die neuen EU-Beitrittsländer exportiert (BMU/UBA 2010), von wo ein Teil für eine weitere Nutzungsphase nochmals ins Nicht-EU-Ausland gelangt. Für 23% ist der weitere Verbleib statistisch nicht belegt.

Beispiel elektronische Konsumgüter

Das Aufkommen an Elektroaltgeräten wächst in der EU schneller als alle anderen Abfallfraktionen aus Haushalten (vgl. UNU 2008, 3). Technisch sind beim Recycling von Leiterplatten, die den Großteil des eingesetzten Palladiums enthalten, Rückgewinnungsquoten von bis zu 95% erreichbar, die wesentlichen Defizite liegen in der Erfassung einerseits und in der Behandlung und Aufbereitung andererseits.

Ein wesentliches Problem ist darin zu sehen, dass relevante Mengen an gebrauchten Elektrogeräten den europäischen Wirtschaftsraum verlassen. Nach (Sander/ Schilling 2010) wurden im Jahr 2008 ca. 155.000 t gebrauchte Elektrogeräte und Elektroaltge-

⁶⁵ Während in Benzinmotoren zu großen Teilen Palladium eingesetzt wird, kommt bei Dieselfahrzeugen bisher hauptsächlich das wesentlich teurere Platin zum Einsatz, das auch bei den niedrigeren Betriebstemperaturen effektiv wirkt (vgl. Brenscheidt 2001, 24).

⁶⁶ Von diesen 8% beträgt der Anteil von Ländern mit guter Recyclinginfrastruktur (Norwegen, Schweiz, USA, Japan etc.) laut Außenhandelsstatistik etwa 10 %.

räte aus Deutschland exportiert, davon alleine etwa ca. 2 Mio. Monitore. Global muss man davon ausgehen, dass davon nur etwa 10% überhaupt einem Recycling zugeführt werden (vgl. LaDou et al. 2007 und UNEP 2010). Unter der Annahme international bindender Verpflichtungen zu hochwertigen Recyclingstandards könnte mittelfristig jedoch durchaus ein internationaler Markt für Langlebigkeit (Re-use) aufgebaut werden.⁶⁷

Aus ressourcen- und umweltpolitischer Perspektive kann ein verbessertes internationales Stoffstrommanagement einen wichtigen Beitrag zur Rohstoffsicherheit, zur Ressourcenschonung und Umweltentlastung leisten.

- Stichwort Rohstoffsicherheit: da die Primärrohstoffgewinnung bei PGM auf sehr wenige Länder (vor allem Russland und Südafrika) begrenzt ist, kann mit jeder Tonne recyceltem Material die Abhängigkeit von diesen Ländern und von Preisentwicklungen in oligopolistisch strukturierten Märkten vermindert werden.
- Stichwort Ressourcenschonung: Die PGM-Vorkommen sind begrenzt. Mit Recycling können diese Vorkommen geschont werden und stehen damit auch für nachfolgenden Generationen zur Verfügung.
- Stichwort Umwelt- und Klimaschutz: das PGM-Recycling ist mit deutlich geringeren Umweltbelastungen verbunden als die primäre Rohstoffgewinnung.

Die ökonomischen und ökologischen Vorteile des PGM-Recyclings werden jedoch bisher nicht vollständig ausgeschöpft, insbesondere da die PGM in wichtigen Anwendungsfeldern wie den Autoabgaskatalysatoren und Elektro(nik)geräten nach der Nutzungsphase in relevanten Mengen in Länder ohne angemessene Recyclinginfrastrukturen exportiert werden und somit für die globale Kreislaufführung verloren gehen. Gleichzeitig nehmen im Elektronikbereich dissipative Anwendungen zu; die geringen Mengen können mit herkömmlichen Recyclingverfahren nicht zurückgewonnen werden. Vor dem Hintergrund dieser Ausgangslage wurden für die ausgewählten Handlungsfelder „Autoabgaskatalysatoren“ und „elektronische Konsumgüter“ Vorschläge zur Verbesserung des internationalen PGM-Stoffstrommanagements entwickelt.

Maßnahmenvorschläge für den Bereich „Autoabgaskatalysatoren“

Auf der Basis umfangreicher Analysen der Defizite im internationalen Stoffstrommanagement und länderspezifischer Fallstudien wurde im Rahmen des Projektes für die industriellen und staatlichen Akteure eine Roadmap entwickelt und mit ihnen auf einem Workshop in Berlin diskutiert und abgestimmt (Lucas/Wilts 2009). Im Einzelnen wur-

⁶⁷ Vgl. die OECD Arbeiten zum Sustainable Materials Management und den Arbeiten zu Rahmenbedingungen der Ressourcenpolitik im Projekt MaRess, insbesondere ‚Internationaler Metall-Covenant‘ und ‚Ressourcenzertifizierung (RIZL)‘.

den folgende Maßnahmen vorgeschlagen, um das PGM-Recycling bezüglich der Autoabgaskatalysatoren zu verbessern:

- Eine Vereinbarung/Commitment zwischen den Akteuren in der Wertschöpfungskette „Katalysator-Recycling“ über Qualitäts- und Umweltstandards in der Redistributions-Logistik und den Verfahren zur Katalysator-Entmantelung und PGM-Rückgewinnung.
- Selbstverpflichtung der Fahrzeug- und Katalysator-Hersteller auf Mindestsammel- u. Recyclingquoten für PGM sowie Quoten für den Einsatz von Sekundär-PGM.
- Aufbau von Redistributionssystemen in den Zielmärkten der 2. und 3. Fahrzeugnutzung durch die Industriepartner (Automobilindustrie/Katalysatorhersteller) im Rahmen ihrer Produktverantwortung zwecks Behandlung in integrierten und hierfür spezialisierten Hüttenwerken.
- Kennzeichnung der Katalysatoren z.B. durch Einsatz der RFID-Technologie zur Unterstützung der Redistribution und, um die Exportströme und den letztendlichen Verbleib der Katalysatoren nachvollziehen zu können, Verbesserung der statistischen Erfassung durch präzisere Deklarationspflichten für den Handel mit gebrauchten Fahrzeugen.

Für diese Maßnahmen ergibt sich ein Zeitfenster von ca. 10 - 15 Jahren, da erst zu diesem Zeitpunkt ein hoher Anteil an Fahrzeugen zur Entsorgung ansteht, der über eine Autoabgasregelung verfügt (je nach Zielland zu differenzieren).

Maßnahmenvorschläge für den Bereich elektronischer Konsumgüter

Die vertiefend untersuchten Produktbereiche Monitore und Mobiltelefone, die beide Palladium enthalten, zeichnen sich durch unterschiedliche Ausgangslagen aus: Während Mobiltelefone in der Regel legal als funktionsfähige Gebrauchtgeräte mit einem positiven Marktwert exportiert werden, handelt es sich bei alten Bildschirmen (vor allem CRT-Monitoren) häufig um illegale Exporte, bei denen die Exportkosten unter den Entsorgungskosten in Deutschland liegen.

Aber auch im Inland ergeben sich Defizite in der Kreislaufführung, wenn Geräte nicht über die davor vorgesehen Systeme erfasst und anschließend einem hochwertigen Recycling zugeführt werden. Für beide Bereiche Mobiltelefone und Monitore zusammen wurde für Deutschland beim gegebenen Stand der Technik ein zusätzliches theoretisches Recyclingpotenzial von ca. 0,75 t PGM berechnet, was die gesamte europäische Nettonachfrage für den Elektronikbereich übertreffen würde (vgl. Johnson Matthey 2010).

Die auf Basis dieser Analyse entwickelten Maßnahmenvorschläge setzen auf unterschiedlichen räumlichen Ebenen an und zielen auf eine verbesserte Koordination von bereits bestehenden Einzelinitiativen im Bereich gebrauchter Elektronikgeräte und Elektroaltgeräte. Grundsätzlicher Ansatz ist eine Stärkung der Herstellerverantwortung

für die Nachnutzungsphase seiner Produkte, wie sie auch im ElektroG vorgesehen ist, bisher aber durch legale und illegale Exporte unterlaufen wird (vgl. Wilts 2009). Im Einzelnen sollten folgende Maßnahmen vorrangig verfolgt werden:

- Ansätze zum Technologie- und Wissenstransfer sollten in solche Entwicklungs- und Schwellenländer ausgeweitet werden, in denen die Nutzungsphase von Elektro- u. Elektronikgeräten endet (sowohl von importierten als auch aus Eigenproduktion). Diese Länder zeichnen sich meist durch sehr hohe Sammelintensität aus, es fehlt jedoch vollständig an der notwendigen Recyclinginfrastruktur (vgl. Yu et al. 2010). Hier lassen sich erhebliche Win-Win-Potenziale erschließen, wenn die Edelmetalle z.B. auf den demontierten Leiterplatten anschließend den international vernetzten Smeltern zugeführt werden anstatt im gesundheits- und umweltgefährdenden „Hinterhofrecycling“ zu landen. – Die erzielbaren Erträge übersteigen deutlich die Transportkosten (vgl. Hagelüken 2010).
- Für den Bereich Mobiltelefone besteht die Notwendigkeit, die Erfassungsquote im Inland deutlich zu steigern. Vorbilder für optimierte Erfassungssysteme z.B. mit ausgewiesenen Recyclinggebühren in Kombination mit einer intensiven Öffentlichkeitsarbeit (nationaler Aktionstag, Unterrichtsmaterialien etc.) existieren z.B. in der Schweiz (vgl. SWICO 2009). Einen zusätzlichen Anreiz könnten Pfandsysteme für Handys darstellen (vgl. MPPI 2009).
- Bei Monitoren ist der illegale Export von Altgeräten durch produktspezifische Festlegungen zur Gebrauchstauglichkeit für die Abgrenzung von Alt- und Gebrauchtgeräten einzudämmen. Darüber hinaus sollten die Geräte im Rahmen der Sperrmüllabfuhr nicht länger vom Straßenrand eingesammelt werden, sondern durch direkte Abholung von Elektro- und Elektronikschrott aus den Haushalten, um die Beraubung von Wertstoffen und Beschädigungen zu vermeiden (Sander/Schilling 2010). Die Transparenz und Sicherheit wird insgesamt erhöht.

Übergreifende Aspekte einer internationalen Stoffstromsteuerung

Die durchgeführten Untersuchungen in beiden Handlungsfeldern haben ergeben, dass das internationale PGM-Stoffstrommanagement von der internationalen Marktentwicklung geprägt ist und der Einfluss nationaler Abfallregimes auf das Stoffstrommanagement sehr begrenzt ist. Auf der internationalen Ebene sind verbindliche zwischenstaatliche Regelungen im Rahmen des WTO-Regimes (freier Welthandel) nicht in Sicht. Vor diesem Hintergrund wird vorgeschlagen, einen kooperativen Governance-Ansatz zu verfolgen, der in den Wertschöpfungsketten des PGM-Recyclings zu verbindlichen Qualitätsstandards führt. Eine führende Rolle bei der Durchsetzung solcher Standards können die international tätigen Metallkonzerne wie Umicore und Johnson Matthey übernehmen, da sie direkt von einer solchen Qualitätssteigerung profitieren würden.

Derartige kooperative Strukturen können bilateral oder multilateral von den Regierungen in der EU und den ihnen nachgeordneten Umweltbehörden unterstützt und geför-

dert werden. Auch UNEP – die mit ihrem Ressource-Panel in diesem Bereich bereits aktiv ist - könnte eine wichtige koordinierende Rolle übernehmen, um z.B. den Erfahrungsaustausch beim Aufbau von effektiven Recyclingsystemen zu verbessern (vgl. UNEP 2010). Entscheidend wird jedoch sein, ob die in Europa führenden Raffinationsbetriebe und deren Kunden aus der Automobilindustrie und der Elektroindustrie sich aktiv beteiligen.

Staatliche Stellen können insgesamt dazu beitragen, den Informationsfluss in den sekundären PGM-Ketten zu verbessern, indem Berichtspflichten vor allem des Handels eingefordert werden. Des Weiteren sollten die anzustrebenden Recycling-Standards (Beste Verfügbare Technik) in Rechtsvorschriften (Altfahrzeugverordnung, Elektrogesetz) Eingang finden. Ein weiterer Ansatzpunkt für staatliches Handeln ist das bestehende Technologie- und Qualifizierungsgefälle zwischen den OECD-Staaten und den Zielländern gebrauchter PGM-haltiger Konsumgüter.

Geeignetes Instrument hierfür wäre der Aufbau eines spezifischen Technologietransfer- und Beratungsprogramms, um in den Zielländern eine geordnete Sammlung, qualitativ hochwertige PGM-Redistribution und Vorbehandlung zu initiieren (zugeschnitten vor allem auf die EU-Beitrittsländer und ausgewählte CEC-Staaten). Eine Veränderung der Redistributionswege durch den Aufbau neuer Metallschmelzen in den Zielländern ist derzeit nicht in Sicht, insofern ist es wahrscheinlich, dass es unter der Bedingung des freien Welthandels die gegenwärtigen Rückführungsstrukturen zu den Metallschmelzen weiter ausgebaut werden.

Literatur

- Abh-Marketingservice (2007): Der Pkw-Aftermarket in Polen. Leseprobe.
www.abh.de/component/rokdownloads/downloads/65...pkw.../download
- ACEA (2008a): Auto industry statement regarding used cars. 14.03.2008. Brussels:
<http://www.autosap.cz/sfiles/zzzz%202008%20fprohl%20ACEA%20en.pdf>, Zugriff: 24.02.2009
- ACEA (2008b): ACEA EU Economic Report February 2007. Brussels.
- Althaus H-J/ Classen M/ Blaser S/ Jungbluth N. (2003): Life cycle inventories of metals, Vol. 10. SwissCentre for Life Cycle Inventories, Zürich.
- Andersen, F./ Larsen, H./ Skovgaard, M. (2008): Projection of end-of-life vehicles. Development of a projection model and estimates of ELVs for 2005-2030. ETC/RWM working paper 2008/2, Kopenhagen.
- Anfac (2010): European Motor Vehicle Parc 2008:
<http://www.acea.be/collection/statistics>
- Angerer, G./ Lorenz, E./ Marscheider-Weidemann, F./ Scharp, M./ Lüllmann, A./ Handke, V./ Arwede, M. (2009): Rohstoffe für Zukunftstechnologien. Einfluss des branchenspezifischen Rohstoffbedarfs in rohstoffintensiven Zukunftstechnologien auf die zukünftige Rohstoffnachfrage. ISI-Schriftenreihe Innovationspotenziale, Karlsruhe.
- Autostat (2009): Ситуация с утилизацией автомобилей в России. Situation with vehicle utilization in Russia:
<http://www.autostat.ru/view.asp?n=421&t=1>
- Babakina, Graedel (2005): The Industrial Platinum Cycle for Russia: A Case Study of Materials Accounting. Yale center for industrial ecology.
- Barba-Gutierrez, Y./ Adenso-Diaz/ Hopp M. (2008): An analysis of some environmental consequences of European electrical and electronic waste regulation. In: Resources, Conservation and Recycling 52 (2008) 481–495.
- Basel Convention (2007): Information Note on the Mobil Phone Partnership Initiative. Basel.
- Beck, M. (2007): Mission Impossible. In: Recycling International, March 2007, S. 20-26.
- Beers D, Bertram M, Fuse K, Spatari S, Graedel T. (2003): The contemporary African copper cycle: one year stocks and flows. In: The Journal of the South African Institute of Mining and Metallurgy. 103, 147-162.
- Bergh, J. van der; Janssen, M. (2004): The Interface between Economics and Industrial Ecology. In: Bergh, J. van der: Economics of Industrial Ecology, Cambridge. MIT Press.
- Bertram M, Graedel T, Rechberger H., Sparati S. (2002): The contemporary European copper cycle: waste management subsystem. Ecological Economics, 42, 43-57.
- Bitkom (2009): Geschäftsbericht 2009. Berlin.

- Bitkom/ GfK (2008): Neue Daten zur Preisentwicklung von TV-Geräten. Presseinformation vom 11. August 2008, Berlin.
- Bleischwitz, R. (2007): Corporate Governance of Sustainability: A Co-Evolutionary View on Resource Management. Edward Elgar Publisher.
- Bloxham, L. (2009): Car Fleet Development in Eastern Europe and PGM Demand. Präsentation auf dem MaRes AP3 Workshop, 24.4.09, Berlin.
- BMU (2005): Ziele und Inhalte des Gesetzes über das Inverkehrbringen, die Rücknahme und die umweltverträgliche Entsorgung von Elektro- und Elektronikgeräten:
http://www.bmu.de/files/pdfs/allgemein/application/pdf/elektrog_ziele_inhalte.pdf,
Zugriff am 8.12.2008.
- BMU (2008): Drei Jahre ElektroG: Bundesumweltministerium und Umweltbundesamt ziehen positive Bilanz. Pressemitteilung Nr. 49/08, Berlin.
- BMU/UBA (2010): Altfahrzeug-Verwertungsquoten in Deutschland im Jahr 2008 gemäß Art. 7 Abs. 2 der Altfahrzeug-Richtlinie 2000/53/EG:
http://www.bmu.de/files/pdfs/allgemein/application/pdf/germany_elv_quota_qualit_yreport.pdf,
Zugriff am 3.12.2010.
- Bohr, P. (2007): The Economics of Electronic Recycling: New Approaches to Extended Producer Responsibility. Dissertation an der TU Berlin, Fakultät Wirtschaft & Management, Berlin.
- Börse-Online vom 29.10.2010: Nützliches Edelmetall: Auto-Boom schiebt Palladium-Preis an:
www.boerse-online.de/Edelmetall-Auto-Boom-schiebt-Palladium-Preis-an/620153.html
- Bosch (2007). Kraftfahrtechnisches Taschenbuch, Wiesbach.
- Brenscheidt, Th. (2001): Katalysatorträger: Ein Überblick. In: Hagelüken, C. (Hrsg.): Autoabgaskatalysatoren. Renningen.
- Brigden, K./ Labunska, I./ Santillo, D./ Allsopp, M. (2005): Recycling of Electronic Wastes in China & India. Greenpeace International Report, Amsterdam.
- Bringezu, S. / Bleischwitz, R. (Hg.) (2009): Sustainable Resource Management. Trends, Visions and Policies for Europe and the World, Greenleaf Publisher
- Bruijn, T. de / Norberg-Bohm, V. (Hg.) (2005): Industrial Transformation: Environmental Policy Innovation in the United States and Europe. Cambridge, Massachusetts and London, England: The MIT Press.
- Buchert, M. (2010): Recycling, Exportproblematik und Reimportchancen? Werthaltige Komponenten am Beispiel des Katalysators:
<http://resourcefever.org/publications/presentations/buchert-Berlin-5Mai2010.pdf>,
Zugriff am 11.4.2011
- Buchert, M./ Hermann, A./ Jenseit, W./ Stahl, H./ Osyguß, B./ Hagelüken, C. (2007): Verbesserung der Edelmetallkreisläufe: Analyse der Exportströme von Gebrauchtpkw und – Elektro(nik)geräten am Hamburger Hafen. Forschungsprojekt im Auftrag des Umweltbundesamtes, Förderkennzeichen 363 01 133. Darmstadt.

- Buchert, M./ Schüler, D./ Bleher, D. (2008): Critical metals for future sustainable technologies and their recycling potential. Draft Report. Freiburg.
- Buck, M./ Helm, C. (1999): Zehn Jahre Basler Übereinkommen : internationaler Handel mit gefährlichen Abfällen. Gutachten im Auftrag der Friedrich-Ebert-Stiftung. Bonn.
- Bundesagentur für Außenwirtschaft (bfai) (2007): Kasachstan modernisiert seine drei Ölraffinerien:
http://www.bfai.de/ext/Export-Einzelsicht/DE/Content/___SharedDocs/Links-Einzeldokumente-Datenbanken/fachdokument,templateId=renderPrint/MKT200711068019.pdf
- Bundesagentur für Außenwirtschaft (bfai) (2007): Kfz-Recycling in Polen könnte kräftig Rohstoffe sparen helfen:
https://www.bfai.de/ext/Export-Einzelsicht/DE/Content/___SharedDocs/Links-Einzeldokumente-Datenbanken/fachdokument,templateId=renderPrint/MKT20070309104709.pdf
- Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe Fachbereiche (BGR) (2007): Rohstoffindustriender Russischen Föderation.
- Bundesregierung (2007): Elemente einer Rohstoffstrategie der Bundesregierung, Stand: März 2007.
- Celiapinas, A. (2009): Telefonat über den ausgefüllten Fragebogen der Firma „EMP recycling“, Notizen Lucas 13. Oktober 2009.
- Central Statistical Bureau of Latvia: Statistical databases:
<http://www.csb.gov.lv/csp/content/?lng=en&cat=355>
- Central Statistical Office Poland (2010): Transport Activity Results in 2009:
http://www.stat.gov.pl/gus/5840_748_ENG_HTML.htm.
- Central Statistical Office Polen: Regional Data Bank:
http://www.stat.gov.pl/bdren_n/app/strona.indeks
- CEPIK (2011):
http://fors.pl/pliki/ilosc_2007_2010.pdf
- Chancerel, P./ Meskers, C./ Hagelüken, C./ Rotter, S. (2008): E-Scrap metals too precious to ignore. Recycling International, November 2008.
- Chancerel, P./ Rotter, S. (2009): Stoffstromanalyse für die Behandlung von Kleingeräten in Deutschland – Beispiel Gold. In: Bilitewski, B./ Werner, P./ Janz, A. (Hrsg.): Brennpunkt ElektroG. Tagungsband zur Fachtagung am 23. April 2009, Dresden.
- Chichorowski, G. (2008): Technische Optionen für eine automatische Produktidentifikation im Bereich des Elektrogeräte-recycling. Sofia-Studien zur Institutionenanalyse 08-1, Darmstadt.
- Culver, J. (2005): The life cycle of a CPU:
www.cpushack.net/life-cycle-of-cpu.html, Zugriff am 9.1.2009.
- Daisuke Numata, D. (2009): Economic analysis of deposit–refund systems with measures for mitigating negative impacts on suppliers. In: Resources, Conservation and Recycling Vol. 53, S. 199–207.

- DESTATIS (=Statistisches Bundesamt) (2008): Umwelt 2006 - Abfallentsorgung. Fachserie 19, Reihe 1. Wiesbaden.
- DESTATIS (2009): Einkommens- und Verbrauchsstichprobe (EVS):
<http://www.destatis.de/jetspeed/portal/cms/Sites/destatis/Internet/DE/Content/Statistiken/WirtschaftsrechnungenZeitbudgets/EinkommensVerbrauchsstichproben/Tab.n/Content75/AusstattungprivaterHaushalteUnterhaltungselektronik,templateId=renderPrint.psml>, Zugriff am 8.7.2009
- Deutsche Umwelthilfe (2007): Hamburg – Das Tor zur Welt für illegale Abfallexporte? DUH-Hintergrund, Hamburg.
- Die Presse vom 04.07.2009: Österreichische Schrottautos für Afrika. Von Norbert Rief:
<http://diepresse.com/home/wirtschaft/international/492556/Oesterreichische-Schrottautos-fuer-Afrika>
- Donchenko V., Kunin Y., Kazmin D.: A Case Study from Russian Federation Promotion of the Public Transport as a Base for Sustainable Urban Transport System in Moscow City, State Scientific and Research Institute of Motor Transport, Moscow.
- Donchenko, V. (2009): Environmental Performance of Motor Vehicles and Fuels in Russian Federation and CIS Countries:
<http://www.thepep.org/en/workplan/urban/documents/Chisinau/Presentations/donchenko.pdf>
- Donchenko, Vadim: Environmental Performances of Motor Vehicles and Fuels in Russian Federation and CIS Countries. Presentation of the Scientific and Research Institut of Motor Transport (NIIAT):
www.unep.org/transport/pcfv/PDF/7GPM_Motorvehicles_Vadim.pdf
- DUH (2007): Knapp ein Jahr ElektroG. Erfahrungsbericht der Deutschen Umwelthilfe zur Umsetzung des Gesetzes. DUH-Hintergrund, Hamburg.
- Eberspächer (2008): Der Kat - schnell von 0 auf 300:
<http://www.eberspaecher.com/abgasprofi/kat/schnell.htm>, abgerufen am 21.10.08.
- EEA (=European Environment Agency) (2004): TERM 2003 33 EEA 31 - Average age of the vehicle fleet.
- EEA (=European Environment Agency) (2008): TERM34 Estimated share of pre Euro/conventional and Euro I-V heavy-duty vehicles, busses and coaches and conventional and 97/24/EC mopeds and motorcycles.
- EMP (2009): Antworten zum "Questionnaire about the recycling of spent catalytic converters and ELV recycling", Wuppertal.
- Empa (2005) The ewaste guide; 2005:
<http://www.ewaste.ch>.

- Erdmann, Georg (1999): Zeitfenster beachten. Möglichkeiten der Ökologisierung der regulären Innovationstätigkeit. Erschienen in: Ökologisches Wirtschaften 2/1999, 21–22:
http://www2.tu-berlin.de/fak3/ifet/ensys/downloads/publications/erdm_1999_zeitfenster_beachten.pdf, Zugriff: 12.11.2008.
- Estonian Waste Act 2004:
<http://www.legaltext.ee/text/en/X40038K5.htm>
- EUP (2007): Directive 2002/95/EC of the European Parliament and of the Council of 27 January 2003 on the restriction of the use of certain hazardous substances in electrical and electronic equipment. Official Journal of the European Union.
- Europäische Kommission (2007): Revised Correspondents' Guidelines No. 1. Subject: Shipments of Waste Electrical and Electronic Equipment. Brüssel.
- Europäische Kommission (2008): Vorschlag für eine Richtlinie des Europäischen Parlaments und des Rates über Elektro- und Elektronik-Altgeräte (Neufassung). Zusammenfassung der Folgenabschätzung. KOM(2008) 810, Brüssel.
- Europäische Kommission (2009): Kommission begrüßt Einigung der Industrie auf ein universelles Ladegerät für Mobiltelefone. Pressemitteilung vom 29.6.09, IP/09/1049, Brüssel.
- Europäische Kommission (2010): How to report on end-of-life vehicles according to Commission Decision 2005/293/EC. Revision by Eurostat 20th April 2010, Brüssel:
<http://epp.eurostat.ec.europa.eu/portal/page/portal/waste/documents/ELV%20Guidance%202010%2004%2020rev.pdf>, Zugriff 9.12.2010.
- European Bank for Reconstruction and Development (2008): Automotive Industry in Russia: Impact of foreign investments in car assembly plants on suppliers' entry. London
- European Commission (2008): European Commission proposes new strategy to address EU critical needs for raw materials, press release, IP/08/1628:
<http://europa.eu/rapid/pressReleasesAction.do?reference=IP/08/1628>
- Eurostat external trade statistics (2009):
Comext_extra-EU27_passengercars_00-08.xls
Comext_extra-EU27_lcv_00-08.xls
Comext_intra-EU27_passengercars_00-08.xls
Comext_intra-EU27_lcv_00-08.xls
http://epp.eurostat.ec.europa.eu/portal/page/portal/external_trade/data/database
- EUWID (=Europäischer Wirtschafts-Informationsdienst) (2008): Gute Geschäfte mit dem Kat-Recycling. In: EUWID, Nr. 43 v. 21.10.2008.
- EWI/ Prognos (2005): Energiereport IV. Die Entwicklung der Energiemärkte bis zum Jahr 2030. Energiewirtschaftliche Referenzprognose. Untersuchung im Auftrag des Bundesministeriums für Wirtschaft und Arbeit, Berlin.
- Federal Custom Service (2005): Verordnung Nr.609 von 12. Oktober 2005 «Über die Bestimmungen zum Schadstoffausstoß von Fahrzeugen“:
www.customs.gov.kg/files/file/doc2/rus

- Fergusson, M. ; IEEP (2007): End-of-life Vehicles Directive – An assessment of the current state of Implementation by Member States'. Studie für das Europäische Parlament:
http://ec.europa.eu/environment/waste/elv_index.htm
- FFTF (Forum for the Future) (2007): Emerging Responsibilities. Managing environmental impacts of end-of-life mobiles in developing countries. London.
- Fischer, C./ Hedal, N./ Carlsen, R./ Doujak, D./ Legg, D./ Oliva, J./ Lüdeking Sparvath, S./ Viisimaa, M./ Weissenbach, T./ Werge, M. (2008): Transboundary shipments of waste in the EU. European Topic Centre on Resource and Waste Management, Copenhagen.
- Focus-Money-Online 2011 a: Platin für die Autoindustrie.
- Focus-Money-Online 2011 b: Edelmetalle- Palladium für Elektronik und Schmuck
- Fornalczyk A. Saturnus M. (2008): Removal of platinum group metals from the used auto catalytic converters. In: METABK 48(2) 133-136 (2009)
- FORS (2009): Eco-Package. Solutions for the motor vehicle sector. The Vehicle Recycling Forum Association (Stowarzyszenie Forum Recyklingu Samochodów) in Warsaw. Warsaw, April 2009
- FORS (2009): Pressemitteilung vom 15.01.2009:
http://fors.pl/pliki/20090108_Informacja_FORS.pdf,
- FORS (2011):
http://fors.pl/pliki/ilosc_prowadzacych.pdf
- Fraunhofer Institut – ISI (2010): Forschungsergebnisse zur Entwicklung der Fahrzeugflotten. Präsentation auf der Homepage. Quelle:
<http://isi.fraunhofer.de/elektromobilitaet/Fahrzeugflotten>
- Fraunhofer-Projektgruppe für Produktions- und Logistikmanagement (2009): Studienpräsentation: Automotive Region Central and Eastern Europe. Produktionsstrukturen von Automobilherstellern und ihrer Zulieferer. Wien. Quelle:
http://www.fraunhofer.at/Images/ARCEE_Studienpraesentation_tcm44-11311.pdf
- Fröhlich, G. (2009): Entsorgung von Elektro- und Elektronikgeräten in der Praxis. In: Thomé-Kozmiensky, K.J./ Goldmann, D. (Hrsg): Recycling und Rohstoffe. Band 2. Neuruppin.
- Führ, M./ Roller, G./ Schmidt, M. (2008): Individuelle Herstellerverantwortung durch Produktkennzeichnung bei Elektro- und Elektronikgeräten. Sofia-Studien zur Institutionenanalyse 08-2, Darmstadt.
- Gambini, G. (2008): EU-27- trade in motor cars in 2007. In: eurostat 79/2008, External trade, Brussels.
- GAO (=United States Government Accountability Office) (2008): EPA Needs to Better Control Harmful U.S. Exports through Stronger Enforcement and More Comprehensive Regulation. Report to the Chairman, Committee on Foreign Affairs, House of Representatives. Washington.
- Gartner (2009): Market Share for Mobile Devices, 1Q09. Stamford.

- Geels, F. (2004): Understanding system innovations: a critical review and a conceptual synthesis, in: B. Elzen, F. Geels, K. Green (Eds.), System Innovation and the Transition to Sustainability, Edward Elgar Publishing Limited, Cheltenham, 2004, S. 19–47.
- Geels, F.W. (2005): Processes and Patterns in Transitions and System Innovations: Refining the Co-evolutionary Multi-level Perspective. Technological Forecasting and Social Change, 72, S. 681-692
- GfK (= Gesellschaft für Konsumforschung) (2009): Marktdaten Mobiltelefone. Nürnberg.
- GFU (2008): Der Markt für Consumer Electronics - Deutschland 2007:
http://www.gfu.de/go/gfu/_ws/resource/_ts_1215529288885/r00ABXQAUGR5bjpb2R1bGVzL3NpdGVzL3dlYnNpdGUvcGFnZXMvaG9tZS9jb25zdW1lci9tYXJrdC9tYWluL19wYWdlX2lkX29fYWYWR2YW5jZWRFNzM4/link01/markt-ce-deutschland.pdf, Zugriff am 08.07.2009.
- Gieshoff, J. (2001): Der Autoabgaskatalysator: Allgemeine Grundlagen. In: Hagelüken, C. (Hrsg.): Autoabgaskatalysatoren. Renningen.
- Goldmann, D. (2009): Stand der Altfahrzeugverwertung – Entwicklungen der letzten zwanzig Jahre und Perspektiven für die Zukunft – In: Thomé-Kozmiensky/Goldmann: Bd. 2, S. 471-490. München.
- Goskomstat der Russischen Federation, Yearbook 2007:
http://www.gks.ru/wps/PA_1_0_S5/Documents/jsp/Detail_default.jsp?category=1112178611292&elementId=1135087342078
- Grin, J., Rotmans, J., Schot, J. (Hrsg.) (2010): Transitions to Sustainable Development. New Directions in the Study of Long Term Transformative Change, New York
- Hagelüken, Buchert, Stahl 2005 (2005): Stoffströme der Platingruppenmetalle. Clausen-Zellerfeld.
- Hagelüken, C. (2001): Autoabgaskatalysatoren. Renningen-Malmsheim: Expert.
- Hagelüken, C. (2005): Der Kreislauf der Platinmetalle – Recycling von Katalysatoren. In: Hagelüken et al. (Hrsg.): Autoabgaskatalysatoren. Expert, Renningen.
- Hagelüken, C. (2005). Optimising the recycling chain: The contribution of an integrated metals smelter and refinery. Paper presented at: Securing the Future 2005, International Conference on Mining, Metals and Energy Recovery, June 27-July 1, 2005, Skellefteå, Sweden.
- Hagelüken, C. (2007): Recycling von Autokatalysatoren – Strukturelle Defizite trotz ausgereifter Technik:
[http://www.technikwissen.de/umwelt/get_article.php?data\[article_id\]=33839](http://www.technikwissen.de/umwelt/get_article.php?data[article_id]=33839), abgerufen am 11.4.2011
- Hagelüken, C. (2007a): The challenge of open cycles – Barriers to a close looped economy demonstrated for consumer electronics and cars, in: Hilty, Edelmann, Ruf (Hg.): R07-World Congress – Recovery of Material and Energy for Resource Efficiency. Empa Materials, Davos/Schweiz.

- Hagelüken, C. (2007b): The PGM-markets and their independencies with autocatalyst. Präsentation CTI Forum Materials, 21. Nov. 2007, Stuttgart:
http://www.preciousmetals.umicore.com/publications/presentations/auto_petrocat/s/show_ThePGMMarkets.pdf, Zugriff 23.09.2008
- Hagelüken, C. (2009): Wir brauchen eine globale Recyclingwirtschaft. GermanWatch, 1/2009, S.3.
- Hagelüken, C. (2010): Recycling von Edel- und Sondermetallen als Schlüsselbeitrag zur Rohstoffsicherung. Beitrag auf der Konferenz Technologiemetalle, 22.9.2010, Frankfurt.
- Hagelüken, C./ Buchert, M./ Ryan, P. (2006): Materials Flow of Platinum Group Metals in Germany. 13th Cirp International Conference On Life Cycle Engineering, S. 477-482.
- Hagelüken, C./ Schluep, M. (2009): Recycling strategischer Metalle aus Elektronikschrott vor dem Hintergrund globaler Materialströme. Vortrag auf der Tagung Re-Source 2009, 24. Juni 2009, Berlin.
- Hagelüken, C./Buchert, M. (2010): Kritische Metalle für Zukunftstechnologien und ihr Recyclingpotenzial. Präsentation: Materialforum Rhein-Main, Hanau 18.01.2010:
http://www.preciousmetals.umicore.com/PMR/Media/sustainability/show_kritische_Metalle.pdf, Zugriff am 11.11.2010.
- Hassan, A. (2001): UBA-Forschungsbericht 299 93 301. Rohstoffeinsparung durch Kreislaufführung von verbrauchten Katalysatoren aus der chemischen Industrie.
- Hassan, A. (2003): UBA-Forschungsbericht 363 01 046. Stand der Verwertung von verbrauchten Katalysatoren aus der chemischen Industrie sowie Einflussfaktoren zur Verbesserung der Kreislaufführung.
- Hicks/Dietmar/Eugster (2005): The recycling and disposal of electrical and electronic waste in China—legislative and market responses. In: Environmental Impact Assessment Review 25 (2005), S. 459– 471.
- Hochfeld, C. (1997): Bilanzierung der Umweltauswirkungen bei der Gewinnung von Platingruppen-Metallen für PKW-Abgaskatalysatoren; Freiburg, Darmstadt, Berlin.
- HP (2006): HP erweitert weltweites Recycling-Programm:
<http://www.channelpartner.de/hp-special/226881/>, Zugriff am 8.7.2009
- Huisman, J. April 2004 a. QWERTY and Eco-Efficiency analysis on cellular phone treatment in Sweden. The eco-efficiency of the direct smelter route versus mandatory disassembly of Printed Circuit Boards. Written for El-Kretsen. Stockholm.
- Huisman, J. (2004): QWERTY and Eco-Efficiency analysis on cellular phone treatment in Sweden. Delft University of Technology, Delft.
- Iakovou, E./ Moussiopoulos, N./ Xanthopoulos, A./ Achillas, Ch./ Michailidis, N./ Chatzipanagioti, M./ Koroneos, C./ Bouzakis, K.-D./ Kikis, V. (2009): A methodological framework for end-of-life management of electronic products. In: Resources, Conservation and Recycling Vol. 53, S. 329–339

- IFQC (International Fuel Quality Center) (2008): Lowering Sulfur in Fuels and Transition to Lead-Free-Petrol: EU Trends and CIS Refining Challenges. UNEP Partnership for Clean Fuels and Vehicles Meeting 2008, Amman.
- IMPEL-TFS (2008): Enforcement of EU Waste Shipment Regulation. Final Report, Amsterdam.
- Interpolihim (2009): ООО Компания Интерполихим. Основные виды деятельности. Präsentation des Unternehmens „Interpolihim“, 2009
- Izdebski J. (2009): Opportunities and challenges for car recycling in Poland. Expert Workshop Recycling of automotive converters in West and East Europe 24 April 2009, Berlin, Germany
- IZT/ Fraunhofer ISI (2009): Rohstoffe für Zukunftstechnologien. Abschlussbericht, Berlin.
- Jacoby, H. (2008): Wachstumschancen gezielt nutzen:
<http://www.kfz-betrieb.vogel.de/internationaler-handel/articles/146972/> , Zugriff am 12.11.2008.
- Janz, A./ Bilitewski, B. (2007): Elektrische und elektronische Altgeräte im Restabfall nach Umsetzung des ElektroG. In: Müll und Abfall, Ausgabe 7/07, S. 325-327.
- Janz, A./ Prella, R./ Müller, F./ Bilitewski, B. (2009): Grenzüberschreitende Ströme von Elektroaltgeräten. In: Müll und Abfall, Vol. 3/09, S. 126-132.
- Jeremiah, M. (2008): Russia Car Market:
<http://www.authorstream.com/Presentation/Jeremiah-53426-russia-car-market-mark-Education-ppt-powerpoint/>
- Johnson Matthey (2010): Platinum 2010. Hertfordshire:
<http://www.platinum.matthey.com/publications/market-data-charts/>, Zugriff am 11.11.2010.
- Johnson Matthey (2007): Platinum Yearbook. Hertfordshire.
- Johnson Matthey (2008): Platinum 2008. Hertfordshire.
- Johnson Matthey (2009): Thrifting of precious metals in autocatalysts. Updated - 13th January 2009:
<http://www.platinum.matthey.com/media-room/our-view-on-.-.-/thrifting-of-precious-metals-in-autocatalysts/>
- KBA = Kraftfahrzeugbundesamt (2008b): Statistische Mitteilungen. Löschungen, Emissionen, Kraftstoffe im Jahr 2006. Flensburg.
- Kommission Der Europäischen Gemeinschaften – KOM (2009) 635 Endgültig: Bericht Der Kommission An Den Rat, Das Europäische Parlament, Den Europäischen Wirtschafts- Und Sozialausschuss Und Den Ausschuss Der Regionen Über Die Durchführung Der Richtlinie 2000/53/Eg Über Altfahrzeuge Für Den Zeitraum 2005-2008, Brüssel, Den 20.11.2009.
- Kopacek, B. (2008): ReLCD: Recycling and Re-Use of LCD Panels. Proceedings of the 19th Waste Management Conference of the IWSMA, 6.-10. Oktober 2008, Durban.
- Krestin, O. (2009): Improving the Recycling of PGM's from Automotive Catalytic Converters. Präsentation auf dem MaRes AP2.2 Workshop, 24.4.09, Berlin.

- Kuchta, K. (2002): Recycling von gebrauchten Autokatalysatoren. Neue arbeitssicherheitstechnische und abfallrechtliche Regelungen. Hamburg.
- Kuhnhenh, K./ Urban, A./ Morgen, R. (2006): Von individueller Produktverantwortung bis zu erhöhter Anlagenkontrolle – verbessertes WEEE-Recycling durch RFID-Anwendungen. In: Urban, A./ Halm, G./ Morgen, M. (Hrsg.): Stoffströme der Kreislaufwirtschaft. Schriftenreihe des Fachgebiets Abfall, Band 5. Kassel.
- Kühr, R. (2008): Die ökologische Kehrseite der Elektrogeräte. In: Jahrbuch Ökologie 2008, Berlin.
- Kuusakoski (2005): A Northern European scrap giant. Recycling International, Oktober, 2005.
- Kybartas A. (2007): Automotive recycling in the Baltic countries. EMP.
- LaDou J (2007): Export of Electronics Equipment Waste. In International Journal of Occupational and Environmental Health 2007;14, p 1-10.
- Latvia ELV-Report 2006:
http://cdr.eionet.europa.eu/lv/eu/elv/envsgjfia/Latvia_report_ELIV_2006.pdf/manage_document
- Latvia's data report on end of life vehicles according to the requirements of the Decision 2005/293/EC, 2006
- Le Monde diplomatique (Hrsg.) (2007) : Atlas der Globalisierung – Die neuen Daten und Fakten zur Lage der Welt. Taz Verlags- und Vertriebs GmbH (Berlin)
- Leonhardt, E. (2007): Geregelte Verantwortungslosigkeit? DUH-Hintergrundpapier, Berlin.
- Lewicki R, Klos Z., Kurczewski P. (2007): Car recycling solutions in Poland in the light of environmental consequence:
www.lcm2007.org/paper/204.pdf
- Lewicki R. (2007): Environmental aspects of car utilization in Poland. Zeszyty Naukowe Politechnikipoznanskiej Nr 62 Maszyny Robocze i Transport, 2007.
- Lewicki R., Klos Z. (2006): Environmental analysis of car recycling processes in Poland. Poznan University of Technology, Faculty of Machines and Transportation, Poland
- Lewicki, R. (2008): University of technology. Faculty of Machines and Transportation. Interview über das Thema Autorecycling in Polen.
- Linscheidt, B. (1998): Ökonomische Anreize in der Abfallpolitik, Berlin, Analytica.
- Litauen: Report of the Member States on the transposition and implementation of Directive 2000/53/EC on end-of-life vehicles.
- Lohse, J./ Winteler, S./ Wulf-Schnabel, J. (1998): Collection targets for waste from electrical and electronic equipment. Commission of the European Communities, DG Environment, Brussels.
- Loorbach, D. (2007): Transition Management: New mode of governance for sustainable development, Utrecht: International Books

- Loorbach, D. (2010): Transition Management for Sustainable Development: A Prescriptive, Complexity-Based Governance Framework, in: Governance: An International Journal of Policy, Administration, and Institutions, 23:1, S. 161-183
- Lucas, R./ Bleischwitz, R./ Krause, M./ Stürmer, M. (2008): Kupfereffizienz – unerschlossene Potenziale, neue Perspektiven. Ergebnisse des Zukunftsdialogs Rohstoffproduktivität und Ressourcenschonung. Wuppertal.
- Lucas, R./ Wilts, H. (2009): Roadmap for the recycling of PGM from catalytic converters on an international level. Paper within the framework of the „Material Efficiency and Resource Conservation“ (MaRess) Project – Task 2.2, Wuppertal.
- Lütkes, Andreas (2010): Erfolgreiche Verhandlungen mit Lieferanten. Vortrag auf dem Kongress „Commodity Masters“ am 9. und 10.2.2010 in Berlin.
- Magalini, F. (2007): Driving factors in WEEE management system design. PhD thesis, Politecnico di Milano.
- Magalini, F./ Huisman, J. (2006): Management of WEEE & Cost Models across the EU. Could the EPR principle lead US to a better Environmental Policy? Maastricht/ Delft.
- Magilligan, P. et al (2011): PGM recycling hitches ride with car sales recovery, in: Recycling International 3/2011:
<http://www.recyclinginternational.com/cms-pro/node/3138>
- Maksimova L. (2007): Russia: Environmental Market. The U.S. Commercial Service.
- Malkov, M. (2009): Interview. Das Interview wurde am 3. August 2009 von Irina Sokolova in Moskau geführt. Das Ergebnis wurde in einer Protokollnotiz festgehalten.
- Masaaki Kuboniwa (2009): Present and Future Problems of Developments of the Russian Auto-industry. RRC Working Paper Series No.15. Russian Research Center. The Institute of Economic Research Hitotsubashi University Kunitachi, Tokyo, JAPAN
- Mehlhart, G./ Merz, C./ Akkermans, L./ Jordal-Jorgensen, J. (2011): European second-hand car market analysis. Final Report. European Commission - DG Climate Action. Contract Number No. 07.0307/2009/549021/SER/C5. Darmstadt.
- Meyer H. (2008): Ukraine - Kfz-Industrie und Kfz-Teile. Bundesagentur für Außenwirtschaft (bfa), Kiew.
- Meyer, I./ Scheffran, J. (2009): Passenger Car Use and Climate Change. Quantifying the Impacts of Technological Innovations Needed for Substantial CO2 Emission Reductions. Österreichisches Institut Für Wirtschaftsforschung. Working Papers, No. 351/09, Wien.
- Microelectronics and Computer Technology Corporation (MCC). 1996. Electronics Industry Environmental Roadmap. Austin, TX: MCC.
- Mining Weekly (2009): As auto industry stumbles, what's in store for platinum? Ausgabe vom 30.04.2009:
<http://www.miningweekly.com/print-version/as-auto-industry-stumbles-whats-in-store-for-platinum-2009>

- Minna Lindholm, Sonia Metzger, Olli-Pekka Mäkirintala, Eelco Smit, Chris Read, Jyri Seppälä, Salla Ahonen (2008): IPP PILOT TASK FORCES. Final progress report. Brüssel.
- Minpromtorg (2009): Проблемный утиль. На переработке автомобилей заработать не дадут. Министерство промышленности и торговли РФ 14 September 2009. Download: <http://www.minprom.gov.ru/pub/566>
- Mitteilungen der Europäischen Kommission, Die Rohstoffinitiative – Sicherung der Versorgung Europas mit den für Wachstum und Beschäftigung notwendigen Gütern, KOM(2008) 699, Brüssel, 4. November 2008.
- Mladenov, N. (2009): Modellierung von Autoabgaskatalysatoren. Genehmigte Dissertation an der Universität Karlsruhe. Karlsruhe.
- MoE/ METI (Japan Ministry of the Environment, and Ministry of Economy, Trade and Industry) (2006): Results of research on flow related to specified kinds of home appliances, Document no. 2–1 of the Fifth Joint Committee for Review of System of Recycling of Home Electrical Appliances; 2006a [in Japanese].
- MoE/ METI (Japan Ministry of the Environment, and Ministry of Economy, Trade and Industry) (2006b): Eco-design by home electrical appliances manufacturers' Reference document no. 5-2 of Fifth Joint Committee for Review of System of Recycling of Home Electrical Appliances; [in Japanese].
- Mooallem, J. (2008): The Afterlife of Cellphones. In: New York Times, Ausgabe vom 13. Januar 2008.
- Moskauer Regierung. Regierungsverordnung vom 5.08.2003 „Über die Sammlung und Verwertung von Altfahrzeugen“:
http://www.mos.ru/cgi-bin/pbl_web?vid=2&osn_id=0&id_rub=2035&news_unom=25268
- MPPI (2004): Mobile Phone Partnership Initiative. Project 3.1: Recovery and recycling of end-of-life mobile phones.
- MPPI (2009): Guideline on the collection of used mobile phones. Basel.
- National Institute of Statistics Romania: Statistical yearbook 2006:
<http://www.insse.ro/cms/files/pdf/ro/cap17.pdf>
- Nnorom, I.C.; Osibanjo, O.; Ogbonna K.C. (2008): Modelling waste generation by the telecom sector in Nigeria: the grey side of the impressive outing. In: Waste Management Research 2008; 26; 317
- NOKIA (2005): Integrated Policy Pilot Project. Stage I Final Report: Life Cycle Environmental Issues of Mobile Phones:
http://ec.europa.eu/environment/ipp/pdf/nokia_mobile_05_04.pdf, Zugriff am 8.7.2009.
- NOKIA (2008): Global consumer survey reveals that majority of old mobile phones are lying in drawers at home and not being recycled. Press Release, 8. Juli 2008. Espoo.

- Nordic Research Network (2001): Modelling Transport, Land-Use and the Environment. Evaluation of fuel consumption in Lithuanian transport sector an environment assessment. Fifth workshop, Stockholm, September 28 - 30, 2001: <http://www.infra.kth.se/tla/tlenet/meet5/papers/Grigonis.pdf>
- Norilsk Nickel (2000): will modernize its platinum group metals ore concentrating plant. Pravda. October 10, 2000.
- Numata, D. (2009): Economic analysis of deposit–refund systems with measures for mitigating negative impacts on suppliers. In: Resources, Conservation and Recycling Vol. 2009/53 S. 199–207
- Pikūnas A., Valiūnas V. (2005): End-of-life vehicles and transport exploitation materials development perspectives in Lithuania. In: Transport and Telecommunication Vol.6, N 2, 2005
- Platinum 2007, Johnson Mattheys Precious Metals Marketing, Hartfordshire, 8 May 2007.
- Preller, R. (2009): Aktuelle Rechtsfragen des Elektro- und Elektronikgerätegesetzes. In: Thomé-Kozmiensky, K.J./ Goldmann, D. (Hrsg): Recycling und Rohstoffe. Band 2. Neuruppin.
- Puckett, J./ Vogel, C. (1994): A Victory for Environment and Justice: The Basel Ban and How it Happened: http://ban.org/about_basel_ban/a_victory.html (Abgerufen am 20.1.09)
- Reinhardt, W.A. (2005): Steer towards clarity. Auto industry seeks improvements to the ELV Directive. In: Waste-Mangement World, Nov./Dec. 2005, S. 63-72.
- Reller, A. (2010): Die Bedeutung strategischer Ressourcen für Schlüsseltechnologien. Präsentation Deutsch-Russische Rohstoff-Konferenz Freiberg , 18. März 2010: http://www.rohstoff-forum.org/content/images/3_rohstoff_konferenz/vortraege/RohstoffKonferenz_VortragProfDrReller_Folien.pdf
- Reller, A./ Bublies, T./ Staudinger, T./ Oswald, I./ Meißner, S./ Allen, M. (2009): The Mobile Phone: Powerful Communicator and Potential Metal Dissipator. In: GAIA 18/2 2009, S. 127-135.
- Report for ActionAid: Swedish links to AngloPlatinum and Impala Platinum's mines in South Africa, Genombrott, Stockholm, 27 December 2007.
- Report of the Member States on the transposition and implementation of Directive 2000/53/EC on end-of-life vehicles.
- RER (Reed Electronics Research). 2005. The yearbook of world electronic data. Oxon: RER.
- Rhein, H.-B. (2009): Quellen & Senken bei der Recyclingorganisation der EAG in Deutschland. In: Thomé-Kozmiensky, K.J./ Goldmann, D. (Hrsg): Recycling und Rohstoffe. Band 2. Neuruppin.
- Rotmans, J., Kemp, R. (2009): Transitioning Policy: Co-production of a new strategic framework for energy innovation policy in the Netherlands. Policy Sciences, 42 (4), S. 301 - 322.
- Rummler, T. (2009): Stand und Entwicklung des ElektroG. In: Bilitewski, B./ Werner, P./ Janz, A. (Hrsg.): Brennpunkt ElektroG. Tagungsband zur Fachtagung am 23. April 2009, Dresden.

- Salhofer, S./ Spitzbart, M. (2009): Vergleich von manueller Demontage und mechanischer Aufbereitung von PCs. Im Erscheinen.
- Salhofer, S./ Spitzbart, M./ Schöps, D./ Meskers, C./ Kriegl, M./ Panowitz, G (2009): Verfahrensvergleich zur Gewinnung von Wertstoffen aus Elektroaltgeräten. In: Bilitewski, B./ Werner, P./ Janz, A. (Hrsg.): Brennpunkt ElektroG. Tagungsband zur Fachtagung am 23. April 2009, Dresden.
- Sander, K./ Schilling, S. (2010) Optimierung der Steuerung und Kontrolle grenzüberschreitender Stoffströme bei Elektroaltgeräten / Elektroschrott. UBA-Texte Nr. 11/2010, Dessau.
- Sander, K./ Schilling, S./ Tojo, N./ v. Rossem, C./ Vernon, J./ George, C. (2007): The Producer Responsibility Principle of the WEEE Directive. Studie im Auftrag der Europäischen Kommission, GD Umwelt. Hamburg.
- Saurat, M./ Bringezu, S. (2008): Platinum Group Metals Flows of Europe. Matisse Working Papers Nr. 20/ 21, Wuppertal.
- Saurat, M./Bringezu, St. (2008a): Platinum Group Metal Flows of Europe- PART I: Global Supply, Use in Industries and the Shift of Environmental Impacts. In: Journal of Industrial Ecology.
- Scharnhorst, W./ Althaus, W./ Classena, M. (2005): The end of life treatment of second generation mobile phone networks: Strategies to reduce the environmental impact. Environmental Impact Assessment Review 25 (2005), S. 540– 566.
- Scheelhaas, T./ Braungart, M. (2009): Kreislaufführung statt mühsames Recyceln, Cradle to Cradle. In: Müll und Abfall 3/09, S. 106-112.
- Schluep M.; Hagelüken C.; et al. (2009): Recycling – from e-waste to resources. Sustainable Innovations and Technology transfer. Industrial sectors studies. Final report.. United Nations Environment Programme (UNEP). StEP – Solving the e-Waste Problem, Paris und Bonn.
- Schönekerl, W. (2009): Erstbehandlung und Quotenmonitoring. Wo liegen die Praxisdefizite. In: Bilitewski, B./ Werner, P./ Janz, A. (Hrsg.): Brennpunkt ElektroG. Tagungsband zur Fachtagung am 23.4.2009, Dresden.
- Scientific and Research Institute of Motor Transport (NIAT): Environmental performances of motor vehicles and fuels in Russian Federation and CIS countries.
- Shih, L.-H. (2001): Reverse logistics system planning for recycling electrical appliances and computers in Taiwan. In: Resources, Conservation and Recycling, Vol. 32, Issue 1, S. 55-72.
- Shinkuma, T./ Minh Huong, N.T. (2008): The flow of E-waste material in the Asian region and a reconsideration of international trade policies on E-waste. In: Environmental Impact Assessment Review.
- Singhal, P. (2005): Integrated Product Policy Pilot Project. Stage I Final Report: Life Cycle Environment Issues of Mobile Phones. Espoo.
- Sjådin A, Hagmar L, Klasson-Wehler E, Kronholm-Diab K, Jakobsson E, Bergman. Flame retardant exposure: polybrominated diphenyl ethers in blood from Swedish workers. Environ Health Perspect 1999;107:643–8.

- SRU = Sachverständigenrat für Umweltfragen (2005): Auf dem Weg zur Europäischen Ressourcenstrategie. Orientierung durch ein Konzept für eine stoffbezogene Umweltpolitik, Berlin.
- SRU = Sachverständigenrat für Umweltfragen (2008): Umweltgutachten 2008. Berlin.
- Stadt Wuppertal, Ressort Umweltschutz (2008): Koordinierung der Abfallwirtschaft: Abfallbilanz der Stadt Wuppertal 2008
- Statistisches Bundesamt (Hrsg.) 2009: Warenverzeichnis für die Außenhandelsstatistik:
www.destatis.de
- Statistisches Bundesamt Deutschland (DeStatis) (2006): Umwelt – Abfallentsorgung. Fachserie 19, Reihe 1. Wiesbaden.
- Stephenson, R. et al. (2004): Electrical Performance Characteristics of MLCC's with low Laydown AgPd Powders. In "CARTS Europe 2004: 18th Annual Passive Components Conference, Oct. 18 – 21, 2004.
- SwedWatch (2009): Out of control. E-waste trade flows from the EU to developing countries. Stockholm.
- SWICO (2009): 8 Millionen alte Handys warten in der Schweiz aufs Recycling. Medienmitteilung vom 1.4.2009, Zürich.
- SWICO (2009): Tätigkeitsbericht 2008 Recycling. Zürich.
- The 2010 National Waste Management Plan Poland:
http://www.mos.gov.pl/kategoria/2208_the_2010_national_waste_management_plan/31.09.2009
- The 2010 National Waste Management Plan:
http://www.mos.gov.pl/kategoria/2208_the_2010_national_waste_management_plan/31.09.2009
- The U.S. Commercial Service (2006): Country or Region: Poland. Report Title: Car Recycling.
- Triebel J. (2008): Branche kompakt. Lettland - Kfz-Industrie und Kfz-Teile. Bundesagentur für Außenwirtschaft (bfai), Riga:
https://www.bfai.de/DE/Content/___SharedDocs/Links-Datenbankabfragen/mkt-branche-kompakt-kfz-integrator.html
- Tsutskareva G. (2009): Opportunities and challenges for car recycling in Russia. Expert Workshop Recycling of automotive converters in West and East Europe 24 April 2009, Berlin, Germany
- UmweltBriefe (2008): Handyrecycling – Deutsche Wissenslücken. Ausgabe 21/2008, S. 6.
- UN (2008): Information Economy Report 2008. Genf.
- UNEP – United Nations Environment Programme (2010): Recycling of "Specialty Metals" - Key to Boom in Clean-Tech Sector, From Solar and Wind Power to Fuel Cells and Energy Efficient Lighting. Pressemitteilung. New York, 13 May 2010:
<http://www.unep.org/Documents.Multilingual/Default.Print.asp?DocumentID=624&ArticleID=6564&l=en>, Zugriff am 11.11.2010.

- UNEP (United Nations Environment programme) (2008): Status of leaded gasoline phase-out in the Central and eastern Europe, Caucasus and central Asia countries:
www.unep.org/pcfv
- United Nations University (2008): Review of Directive 2002/96 on Waste Electrical and Electronic Equipment. Final Report. Bonn.
- UNU (2008): Review of Directive 2002/96 on Waste Eletrical and Electronic Equipment. Final Report. Bonn.
- USGS (US Geological Survey) (2008): Minerals Yearbook 2008. Platin-Group Metals. Reston.
- v. Gelder, J.W./ Kammeraat, K. (2008): Platinum from AngloPlatinum in catalysts of European car manufactures. Research Paper by Profundo, Castricum.
- van de Pol, R. (2004): Der digitale Graben als Faktor des sozio-kulturellen Wandels? Universität Zürich.
- Vehlow, J. et al. (2003) : Auswirkungen verschiedener Kunststoffabfälle auf die Abfallverbrennung. In: Umweltpraxis 1-2 (2003) ODER:
- Verband der Automobilindustrie VDA (2008): Auto. Jahresbericht 2008:
www.vda.de/de/downloads/489/
- VKS (2008): Betriebsdatenauswertung 2006. Köln.
- Voß, J.-P., Bauknecht, D., Kemp, R. (Hrsg) (2006): Reflexive Governance for Sustainable Development. Cheltenham
- Walls, M./ Palmer, K. (2001): Upstream pollution, downstream waste disposal, and the design of comprehensive environmental policies. In: Journal of Environmental Economics and Management; Vol. 41(1): S. 94–108.
- Webasto AG (2010): Erfolgreiche Verhandlungen mit Lieferanten. In: Econique (Hrsg.) Tagungsdokumentation „Commodity Masters“, 9./10. Februar, Berlin.
- Werland, S./ Jacob, K. (2009): Produktbezogene Mindeststandards zur Erhöhung der Ressourcen- und Materialeffizienz im Bereich IKT: Das Instrument „Dynamische Standardsetzung/ Ressourcen- Top Runner“. Arbeitspapier im Projekt MaRess, AP3, Berlin.
- Widmer, R./ Oswald-Krapf, H./ Sinha-Khetriwal, D./ Schnellmann, M./ Böni, H. (2005): Global perspectives on e-waste. In: Environmental Impact Assessment Review, Vol. 25, S. 436-458.
- Wilburn, David R./ Bleiwas, Donald I. (2005) Platinum-Group Metals—World Supply and Demand. U.S. Geological Survey Open-File Report 2004-1224. Reston.
- Wilts, H. (2008): Das Hotelling-Modell und die Backstop-Technologie. Köln.
- Wilts, H. (2009): Erweiterte Produzentenverantwortung – Chancen und Grenzen. Institutionen ökologischer Nachhaltigkeit. Normative und institutionelle Grundfragen der Ökonomik. 9.-11. 3. 2009, Tutzing.
- Wolk after sales experts gmbh (2009): „PKW- Aftermarket Europa 2009“:
www.wolk-aftersales.com/.../26-highlights-car-aftermarket-europe.html

- Workshop on “Legislation on End-of-Life vehicles (ELV) and management of ELV in the Baltic States”, 5-6 June 2003, Sigulda, Latvia.
- Workshop on “Legislation on End-of-Life vehicles (ELV) and management of ELV in the Baltic States”, 5-6 June 2003, Sigulda, Latvia
- Wötzel, K. (2007): Ökobilanzierung der Altfahrzeugverwertung am Fallbeispiel eines Mittelklassefahrzeuges und Entwicklung der Allokationsmethodik. Dissertation an der TU Braunschweig, Fakultät für Architektur, Bauingenieurwesen und Umweltwissenschaften. Braunschweig.
- Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie (Hg.) (2007): Fair Future. Begrenzte Ressourcen und globale Gerechtigkeit, 3. Auflage, München.
- Yoshida, A. (2005): China: The Largest Importer of Recyclable Waste Importer. In Kojima, M (Hrsg.): International Trade of Recyclable Resources in Asia, Institute of Developing Economies. Tokyo.
- Yu, J./ Williams, E./ Ju, M./ Yang, Y. (2010) Forecasting Global Generation of Obsolete Personal Computers. Environmental Science & Technology.
- Zhechkov R., Viisimaa M. (2005): Evaluation of waste policies related to the Landfill Directive Estonia. European Topic Centre on Resource and Waste Management (ETC/RWM), Copenhagen 2008.
- Zundel, Stefan/ Nill, Jan / Sartorius, Christian (2005): Zeitfenster vorbereiten, öffnen und nutzen - Strategien für eine ökologische Innovationspolitik. In: Jahrbuch Ökologische Ökonomik 4: Innovationen und Nachhaltigkeit. Metropolis-Verlag , Marburg 2005, S. 95-122
- ZVEI (2003): Umbrella Specification. Passive Components: Ceramic Capacitors. 2003a:
http://www.zvei.org/fileadmin/user_upload/Fachverbaende/Electronic_Components/Umbrella_Specs/Passive_Components/Ceramic_Capacitors/USpecs_MLCC_DR_Ver02.pdf, Zugriff am 06.10.2008.
- Авторециклинг – новая индустрия России? Журнал Рециклинг отходов Nr.1 (19) Февраль 2006.
- Бизнес на вторичных автокатализаторах. Журнал Рециклинг отходов Nr.1 (19) Февраль 2009.
- ООО Компания Интерполихим. Основные виды деятельности. Presentation des Unternehmens „Interpolihim“, 2009
- Decree of 27th April 2001 on waste (Official Journal of 2007 No. 39, Item 251, further amended);
 - Decree No. 25/202 of 2005 on the recycling of ELV (Official Journal of 2005 No. 25, Item 202, further amended. Original title: Ustawa Dz.U. 05.25.202 o recyklingu pojazdów wycofanych z eksploatacji);
 - Decree No. 143/1206 of 2005 on the collection of ELV (Official Journal of 2005 No. 143, Item 1206. Original title: Rozporz. dzenie Ministra Gospodarki i Pracy Dz.U. 05.143.1206. sprawie minimalnych wymagan dla stacji demontau oraz sposobu demontazu pojazdów wycofanych z eksploatacji);

- Decree No. 2/9 of 2006 on material coding standards (Official Journal of 2005 No. 2, Item 9. Original title: Rozporządzenie Ministra Gospodarki Dz.U. 06.29 w sprawie sposobu oznaczania oraz rodzajów oznaczeń przedmiotów wyposażenia i części pojazdów).

Internetquellen

ASM-Holding (Avtoselkhoz mash Holding):

www.asm-holding.ru

Automotive Manufactures and Importers Association (APIA):

www.apia.ro

Basel Action Network:

www.ban.org

CBI = Centre Of Promotion Imports From Developing Countries:

http://www.cbi.eu/marketinfo/cbi/docs/latvia_legislation_substances_in_vehicles

http://www.cbi.eu/marketinfo/cbi/docs/lithuania_legislation_substances_in_vehicles

http://www.cbi.eu/marketinfo/cbi/docs/estonia_legislation_substances_in_vehicles

Deutsche Umwelthilfe:

www.duh.de

Dieselnet:

<http://www.dieselnet.com/standards/ru/>

Displaysearch:

<http://www.displaysearch.com>

Eionet:

http://scp.eionet.europa.eu/facts/factsheets_waste/2006_edition/Lithuania

EMP:

<http://www.emp.lt/en>

epcos:

<http://www.epcos.de/web/generator/Web/Sections/Components/Page,locale=nn,r=247996,a=371442.html>

ETC/RWM:

<http://scp.eionet.europa.eu/>

Eurostat:

<http://epp.eurostat.ec.europa.eu/tgm/table.do?tab=table&init=1&language=de&code=tsdpc340&plugin=1>

<http://epp.eurostat.ec.europa.eu/tgm/table.do?tab=table&init=1&language=de&code=tps00001&plugin=1>

http://appsso.eurostat.ec.europa.eu/nui/show.do?dataset=road_eqr_carm&lang=de

http://appsso.eurostat.ec.europa.eu/nui/show.do?dataset=road_eqs_carmot&lang=de

http://appsso.eurostat.ec.europa.eu/nui/show.do?dataset=road_eqs_carhab&lang=de

<http://epp.eurostat.ec.europa.eu/portal/page/portal/waste/data/wastestreams/elvs>

Focus Money online:

http://www.focus.de/finanzen/boerse/tid-20955/edelmetalle-palladium-fuer-elektronik-und-schmuck_aid_588865.html

http://www.focus.de/finanzen/boerse/tid-20955/edelmetalle-platin-fuer-die-autoindustrie_aid_588864.html

Handyverkaufen:

www.handyverkaufen.de

IBM (International Business Machines Corporation):

www.ibm.de

Impel:

<http://impel.eu/about/organisation>

Initiative Energieeffizienz:

www.initiative-energieeffizienz.de

Ministerium für Naturressourcen der Russischen Föderation (MNR):

<http://www.mnr.gov.ru/>

Ministerium für Umwelt in Polen:

<http://www.mos.gov.pl/>

Ministerium für Wirtschaft in Polen:

<http://www.mg.gov.pl/English>

Ministry of the Environment Estonia:

<http://www.envir.ee/257236>

Prad:

<http://www.prad.de>

Staatskomitees für Statistik Kasachstan:

<http://www.stat.kz/digital/Pages/Transport.aspx>

Staatskomitees für Statistik Ukraine:

<http://www.ukrstat.gov.ua/>

Anhang

Wir möchten uns an dieser Stelle bei allen bedanken, die uns bei den Recherchen zu diesem Bericht unterstützt haben, als Interviewpartner zur Verfügung standen und uns Unterlagen überlassen haben.

Diese Anlage enthält folgende Dokumente:

1. Das Programm des Workshops „Improving the Recycling of Platinum Group Metals (PGM) from Automotive Catalytic Converters“,
2. die Teilnehmerliste ExpertInnen-Workshop am 27. Januar 2010 in der Berlin - Brandenburgischen Akademie der Wissenschaften,
3. eine Liste der kontaktierten Institutionen,
4. den Fragebogen der geführten Interviews.

1 Programm des Workshops „Improving the Recycling of Platinum Group Metals (PGM) from Automotive Catalytic Converters“

Date: 24.04.2009, 10.00 – 17.00

Place: VDI/VDE Innovation + Technik GmbH,

Bereich Innovation und Kooperation

Steinplatz 1

10623 Berlin

Germany

Workshop Programme

Session 1 Chair: Rainer Lucas (Wuppertal Institute)

- | | |
|-------------|--|
| 10.00-10.10 | Welcome and introduction
Rainer Lucas |
| 10.10-10.30 | PGM-losses as an environmental burden
Regina Kohlmeier (Federal Environment Agency) |
| 10.30-11.00 | Closing the PGM-loop – challenges and opportunities for a better redistribution and treatment
Dr. Christian Hagelüken (Umicore) |
| 11.00-11.30 | How to improve the value chain management? Economic and technical aspects. Oliver Krestin (Duesmann & Hensel Recycling GmbH) |
| 11.30-12.00 | Converters management within the MeRSy-Management
Anita Engler (Daimler AG, Sindelfingen) |
| 12.00-12.45 | Lunch |

Session 2 Chair: Rainer Lucas (Wuppertal Institute)

12.45-13.00	Car fleet development in Eastern Europe and PGM demand Dr. Lucy Bloxham (Johnson Matthey, Great Britain)
13.00-13.30	Opportunities and challenges for car recycling in Poland Jerzy Izdebski (Forum Car Recycling, Poland)
13.30-14.00	Opportunities and challenges for car recycling in Russia Galina Tsutskareva (Magazin „Wasterecycling“, St. Petersburg)
14.00-14.30	Platin Group Metals Recycling in Russia – material flow analysis, actors and technologies Dr. Vladimir Shipachev (Nikolaev Institute of Inorganic Chemistry Siberian Branch of Russian Academy of Sciences)
14.30-15.0	Coffee Break
Session 3	Chair: Prof. Dr. Raimund Bleischwitz (Wuppertal Institute)
15.00-15.15	International redistribution of secondary PGM flows - Proposals for a roadmap and further collaboration Rainer Lucas
15.15-16.45	Round table discussion - Participants Prof. Dr. Avraam Karagianidis, Aristotel University Thessaloniki) Dr. Christian Hagelüken (UMICORE) Rainer Lucas (Wuppertal Institute) Galina Tsutskareva Regina Kohlmeyer (Federal Environment Agency) (...)
16.45-17.00	Conclusion/ Outlook

2 Teilnehmerliste ExpertInnen-Workshop am 27. Januar 2010 in der Berlin - Brandenburgischen Akademie der Wissenschaften

Teilnehmer	Institution, E-Mail
Bringezu, Dr. Stefan	Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie FG 3 Stoffströme und Ressourcenmanagement
Brinkmann, Anna	Umweltbundesamt, I 3.1 Umwelt und Verkehr
Deilmann, Clemens	Leibniz-Institut für ökologische Raumentwicklung
Fekkak, Miriam	Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie FG 3 Stoffströme und Ressourcenmanagement
Fritsche, Uwe R.	Öko-Institut e.V. Energie und Klimaschutz
Gerber, Dr. Ulf	TU Dresden Professur für Gestaltung von Bahnanlagen
Hennicke, Prof. Dr. Peter	Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie
Herkner, Thomas	BDEW Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft e.V.
Hillenbrand, Dr. Thomas	Fraunhofer Institut für System- und Innovationsforschung ISI Geschäftsfeld Wasserwirtschaft
Hillmann, Roderich	Bundesanstalt für Straßenwesen
Hintemann, Ralf	Borderstep Institut
Klassert, Dr. Anton	DKI Deutsches Kupferinstitut
Klusmann, Dr. Bernd	BITKOM e.V. Technologie Green IT Beratungsbüro
Köhn, Marina	Umweltbundesamt, Z 7-B Informationstechnik
König, Dr. Florian	BITKOM e.V. Kommunikation Green IT Beratungsbüro
Koziol, Prof. Dr. Matthias	Brandenburgische Technische Universität Cottbus Institut für Städtebau und Landschaftsplanung
Link, Dr. Heike	DIW Berlin Abteilung Energie, Verkehr, Umwelt
Löwe, Christian	Umweltbundesamt, III 1.1 Produktbezogener Umweltschutz
Müller, Felix	Umweltbundesamt, III 2.2 Stoffkreisläufe, Mineralindustrie
Penn-Bressel, Gertrude	Umweltbundesamt, FGL I 2.3
Sardison, Dr. Markus	Telefonica O2 Environmental Management External Communications
Scharp, Dr. Michael	Institut für Zukunftsstudien und Technologiebewertung
Schiller, Georg	Leibniz-Institut für ökologische Raumentwicklung
Schmied, Martin	Öko-Institut e.V. Infrastruktur und Unternehmen
Steger, Sören	Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie FG 3 Stoffströme und Ressourcenmanagement
Stoffregen, Alexander	PE International
Tananow, Dr. Oliver	Telefonica O2 Blitzschutz, Network, Regional Engineering Build North-East

Vollmer, Carla	Umweltbundesamt, I 2.3 Erneuerbare Energien
Wachsmann, Ulrike	Umweltbundesamt, I 2.2 Energiestrategien und Szenarien
Wehmeier, Dr. Thomas	Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung Referat I 5 Verkehr und Umwelt
Woitas, Alexander	VDI Zentrum Ressourceneffizienz

3 Liste der kontaktierten Institutionen

Russia

- Industrie-Gesellschaft «Vtormet»
URL: www.icvtormet.ru
- The council of the Federation Committee for industrial policy in Russia
URL: http://council.gov.ru/kom_home/kom_prompol/
- Joint Stock Company Ural Electrochemical integrated Plant (UEIP). Automotive Emission Catalyst Units Production Facility
URL: www.ueip.ru.
- JSC "Krastsvetmet" The Gulidov Krasnoyarsk Non-Ferrous Metals Plant. Refining
URL: <http://www.krastsvetmet.com/>
- Russian Association of Recycling
URL: <http://www.rosaro.ru/>
- Scientific and Research Institute of Motor Transport (NIIAT)
URL: <http://www.niiat.ru/en/>
- The Company «Dragtsvetmet»
URL: <http://www.dsm1.ru/en/>
- Interpolihim
URL: <http://www.interpolihim.ru/>
- Recycling Othodov magazine
URL: www.wasterecycling.ru
- Institution of the Russian Academy of Sciences
- The Nikolaev Institute of Inorganic Chemistry of the Siberian Branch of the RAS
URL: <http://www.niic.nsc.ru/>

Polen

- Chief Inspectorate of Environmental Protection/Główny Inspektor Ochrony Środowiska.
URL: www.gios.gov.pl/
- Stowarzyszenie FORUM RECYKLINGU SAMOCHODÓW
URL: <http://fors.pl/>

- Stal-Car

Baltische Länder

- UAB EMP Recycling

URL: www.emp.eu,

4 Fragebogen der geführten Interviews

Questionnaire about the recycling of spent catalytic converters and ELV recycling

The survey is conducted by the Wuppertal Institute for Climate, Environment and Energy, which is a non-governmental research centre.

The aim of the survey is to research the efficiency of the material use in order to increase the natural resources conservation. The questionnaire will help in answering some important questions concerning precious metal flows, which can be found in the used automobiles.

I. General information

In the first part of the questionnaire the number and size of actors operating on the market is of interest as well as role, which they are playing in the ELV recycling and spent catalytic convertors.

Please give some general information about the state of company.

1. Name of the Organisation/Contact

.....

.....

.....

.....

2. Main areas of work

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

II. The recycling of spent catalytic converters

In this part of questionnaire we try to identify the problems in the field of the recycling of spent catalytic converters.

1. Does the recycling system of spent catalytic converters exist in the country?

.....

.....

.....

.....

2. Does the recycling system of spent catalytic converters an independent branch or include in the recycling of ELV?

.....

.....

.....

.....

3. Who are the relevant actors (companies and institutions), which cooperate on the market of spent catalytic converters recycling?

.....

.....

.....

.....

4. Do you have any data about the volume of collecting and recycled catalytic converters (last 3 years)?

.....

.....

.....

.....

5. What kinds of technology for recovery of PGM are commonly used in your company (Pyrometallurgy, Hydrometallurgy)?

.....

.....

.....

.....

.....

.....

6. What do you think about the main problems of the spent catalytic converters recycling?

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

7. What do you think about who can change the situation? Please, write the names of the actors (companies/institutions), which have influence on the situation.

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

8. Do you have international partners? Please, write the names of the partners.

.....

.....

.....

.....

III. The roadmap

The roadmap, designed to suite the PGM-materials flow management, should contribute innovatively to designing a medium-term and long-term resource policy on the field of “PGM-recycling of catalytic converters” allow for resource conservation. The different measures should complement one another. It has to be assumed that the implementation of not more than one type of measures will not have the desired effect. A mix of instruments is necessary to reach the following aims:

- Increasing the productivity of resources and avoiding losses of PGM
- Transparency of the PGM-material flow on a national and international level
- Improving the cooperation in the value creation chain of
- ELV/catalytic converters recycling
- Incentives for the establishment of the best recycling proceedings
- Increasing the pressure of rules and enforcement to avoid losses

The roadmap is divided into four fields of measures facing different problems. An assignment of responsibilities and competences on different operating levels is guaranteed by the orientation towards the context of the main problem. Therefore, the problem of the different levels of political and organisational arrangement is allowed for as well as the context of decisions is brought more into focus.

5.1.1 Questions regarding the Roadmap

1. Will the international cooperation regarding the PGM recycling change the geography of recycling?

.....

.....

.....

.....

2. Do you consider the roadmap as a suitable strategic tool to address the issue of future international PGM recycling?

.....

.....

.....

.....

3. Do you have any general comments on the proposed roadmap?

.....

.....

.....

.....

4. What are your specific comments on the measures proposed?

Field of measures A „Determination of quality standards for catalytic converters logistics and dismantling of catalytic converters”:

.....

.....
.....
.....

Field of measures B „Construction of an international system of redistribution”

.....
.....
.....
.....

Field of measures C „Import and export of used cars”

.....
.....
.....
.....

Field of measures D „Transfer of technology and knowledge for the newest entrants to the EU and the former states of the CIS (Commonwealth of Independent States)”

.....
.....
.....
.....

5. What priorities would you suggest?

.....

.....

.....

.....

6. Who should take action? Who should be responsible for specific measures?

Please, write the names of the actors (companies/institutions)

.....

.....

.....

.....

7. Would your company be interested in cooperation with the Wuppertal Institute for Climate, Environment and Energy in terms of knowledge transfer and building the intentional connections network?

.....

.....

.....

.....

Sören Steger
Miriam Fekkak
Dr. Stefan Bringezu (Projektleitung)

Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie GmbH

Materialbestand und Materialflüsse in Infrastrukturen

Meilensteinbericht des Arbeitspakets 2.3 des Projekts
„Materialeffizienz und Ressourcenschonung“ (MaRess)



Kontakt zu den Autor(inn)en:

Sören Steger

Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie GmbH
42103 Wuppertal, Döppersberg 19

Tel.: +49 (0) 202 2492 -162, Fax: -138

Mail: soeren.steger@wupperinst.org

**„Materialeffizienz und Ressourcenschonung“
(MaRes) – Projekt im Auftrag des BMU I UBA**

Projektlaufzeit: 07/2007 – 12/2010

Projektleitung:

Dr. Kora Kristof / Prof. Dr. Peter Hennicke

Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie GmbH
42103 Wuppertal, Döppersberg 19

Tel.: +49 (0) 202 2492 -183 / -136, Fax: -198 / -145

Mail: kora.kristof@wupperinst.org

peter.hennicke@wupperinst.org

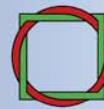
© Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie GmbH

Weitere Informationen zum Projekt

„Materialeffizienz und Ressourcenschonung“ (MaRes)
finden Sie unter **www.ressourcen.wupperinst.org**

Gefördert wird das Vorhaben im Rahmen des UFOPLAN
durch das BMU und das UBA, Förderkennzeichen: 3707 93 300

Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung
liegt bei den Autor(inn)en.



Wuppertal Institut
für Klima, Umwelt, Energie
GmbH

**Wuppertal Institut
in Kooperation mit**

BASF
Borderstep
CSCP
Daimler
demea – VDI / VDE-IT
ECN
EFA NRW
FhG IAO
FhG UMSICHT
FU Berlin
GoYa!
GWS
Hochschule Pforzheim
IFEU
Institut für Verbraucherjournalismus
IÖW
IZT
MediaCompany
Ökopol
RWTH Aachen
SRH Hochschule Calw
Stiftung Warentest
ThyssenKrupp
Trifolium
TU Berlin
TU Darmstadt
TU Dresden
Universität Kassel
Universität Lüneburg
ZEW



Bundesministerium
für Umwelt, Naturschutz
und Reaktorsicherheit

**Umwelt
Bundes
Amt** 
Für Mensch und Umwelt

MaRess AP 2.3. Öffentliche Infrastrukturen

Endbericht

Sören Steger

Miriam Fekkak

Dr. Stefan Bringezu (Projektleitung)

(alle WI)

Wuppertal, 1. Juli 2011

Inhaltsverzeichnis

Vorwort und Danksagung	xiv
1 Einleitung	1
2 Methodische Vorgehensweise	2
3 Verkehrsinfrastruktur	6
3.1 Straßeninfrastruktur	6
3.1.1 Straßenaufbau	6
3.1.2 Materialbestand der Straßeninfrastruktur	11
3.1.3 Jährliche Materialflüsse für den Neu- und Ausbau der Straßeninfrastruktur	14
3.1.4 Jährliche Materialflüsse für die Instandhaltung der Straßeninfrastruktur	17
3.2 Materialbestand und jährliche Materialflüsse für Ingenieurbauwerke der Bundesfernstraßen	20
3.2.1 Ingenieurbauwerke: Brücken und Tunnel	20
3.2.2 Materialbestand der Ingenieurbauwerke an Bundesfernstraßen	21
3.2.3 Jährliche Materialflüsse für den Neu- und Ausbau von Ingenieurbauwerken an Bundesfernstraßen	22
3.2.4 Jährliche Materialflüsse für die Instandhaltung von Ingenieurbauwerken an Bundesfernstraßen	23
3.3 Schieneninfrastrukturen	25
3.3.1 Netzlänge und Aufbau der Schieneninfrastruktur in Deutschland	25
3.3.2 Materialbestand der Schieneninfrastrukturen	32
3.3.3 Jährlicher Materialbedarf für Neu- und Ausbau der Schieneninfrastruktur	39
3.3.4 Jährlicher Materialbedarf für die Erneuerung und Instandhaltung der Schieneninfrastruktur	42
3.4 Wasserstraßen	46
3.4.1 Materialbestand der Wasserstraßen-Infrastrukturen	48

3.4.2	Jährlicher Materialbedarf der Wasserstraßen-Infrastrukturen	52
3.5	Kumulierter Materialaufwand	55
3.5.1	Straßeninfrastruktur	56
3.5.2	Ingenieurbauwerke der Bundesfernstraßen	56
3.5.3	Schienerinfrastruktur	58
3.5.4	Wasserstraßen	59
3.6	Zusammenfassung Verkehrsinfrastrukturen	61
4	Trink- und Abwasserinfrastruktur	65
4.1	Materialbestände und –flüsse der Infrastrukturen der Wasserversorgung	67
4.1.1	Talsperren	68
4.1.2	Brunnen	73
4.1.3	Quellwasserfassungen	74
4.1.4	Wasserwerke	75
4.1.5	Versorgungsnetz	78
4.1.6	Trinkwasserspeicher	84
4.1.7	Pumpwerke	88
4.2	Materialbestände und –flüsse der Infrastrukturen der Abwasserentsorgung	90
4.2.1	Kanalisation	91
4.2.2	Schächte	101
4.2.3	Pumpwerke	106
4.2.4	Regenentlastungsanlagen	107
4.2.5	Kläranlagen	110
4.3	Kumulierter Materialaufwand	116
4.4	Zusammenfassung Wasserinfrastruktur	119
5	Energieinfrastruktur	122
5.1	Energieverteilung	123
5.1.1	Elektrizitätsnetz	123
5.1.2	Erdgasnetz	134
5.1.3	Das Fernwärmenetz in Deutschland	142

5.2	Infrastruktureinrichtungen zur Energieerzeugung _____	151
5.2.1	Materialbestand und Materialflüsse der Braunkohle- und Steinkohlekraftwerke _____	152
5.2.2	Materialbestand und Materialflüsse der Erdgaskraftwerke _____	158
5.2.3	Materialbestand und Materialflüsse von Blockheizkraftwerken (BHKW) _____	161
5.2.4	Materialbestand und Materialflüsse der Kernkraftwerke _____	164
5.2.5	Materialbestand und Materialflüsse der Wasserkraftanlagen _____	167
5.2.6	Materialbestand und Materialflüsse der Windenergieanlagen _____	171
5.2.7	Materialbestand und Materialflüsse der Biogasinfrasturktur _____	178
5.3	Kumulierter Materialaufwand der Energieinfrastruktur _____	186
5.4	Zusammenfassung Energieinfrastruktur _____	189
6	Überblick über die jährlichen Materialflüsse unter Einbeziehung der Abbruchmengen und ihrer Behandlung / Verwertung _____	196
6.1	Straßeninfrastruktur _____	198
6.2	Ingenieurbauwerke der Bundesfernstraßen _____	200
6.3	Schieneninfrastruktur _____	201
6.4	Wasserstraßen _____	204
6.5	Wasserinfrastruktur _____	206
6.6	Abwasserinfrastruktur _____	210
6.7	Energieverteilung _____	214
6.8	Energieerzeugung _____	218
7	Zusammenfassung und Handlungsempfehlungen _____	222
8	Literatur _____	237
9	Anhang _____	251

Abbildungen

Abb. 1: Querschnitt einer Asphaltstraße	7
Abb. 2: Schema zur Abschätzung des Straßenbestandes (nach Ulbricht 2006)	10
Abb. 3: Übersicht über die Binnenwasserstraßen des Bundes (klassifiziert)	47
Abb. 4: System der Wasserver- und Abwasserentsorgung	66
Abb. 5: Anlagen der Wasserversorgung	68
Abb. 6: Anlagen der Wasserentsorgung	90
Abb. 7: Misch- und Trennkanalisation	92
Abb. 8: Schematischer Aufbau eines Einstiegsschachtes	102
Abb. 9: Übersicht über Netzformen der Fernwärmeversorgung	144
Abb. 10: Windenergieanlagen in Deutschland	172
Abb. 11: Zuwachs und Bestand an Biogasanlagen	183
Abb. 12: Flussdiagramm mineralische Rohstoffe Straßeninfrastruktur	199
Abb. 13: Flussdiagramm für Stahl und Beton in Ingenieurbauwerken der Bundesfernstraßen	200
Abb. 14: Flussdiagramm der mineralischen Rohstoffe der Schieneninfrastruktur (ohne Metalle)	202
Abb. 15: Flussdiagramm der metallischen Rohstoffe der Schieneninfrastruktur	203
Abb. 16: Flussdiagramm Kunststoffe und sonstige Materialien der Schieneninfrastruktur	204
Abb. 17: Flussdiagramm der mineralischen Baustoffe in Wasserstraßen – Infrastrukturen	205
Abb. 18: Flussdiagramm der metallischen Rohstoffe in Wasserstraßen	206
Abb. 19: Flussdiagramm der jährlichen Materialflüsse in Wasserinfrastrukturen	208
Abb. 20: Flussdiagramm der metallischen Rohstoffe in Wasserinfrastrukturen	209
Abb. 21: Flussdiagramm der Kunststoffe und sonstigen Materialien in Wasserinfrastrukturen	210
Abb. 22: Flussdiagramm der mineralischen Rohstoffe in Abwasserinfrastrukturen	212
Abb. 23: Flussdiagramm der metallischen Rohstoffe in Abwasserinfrastrukturen	213
Abb. 24: Flussdiagramm der Kunststoffe und sonstigen Materialien in Abwasserinfrastrukturen	214

Abb. 25: Materialflussdiagramm mineralische Rohstoffe der Energieverteilung ____	216
Abb. 26: Materialflussdiagramm metallische Rohstoffe der Energieverteilung ____	217
Abb. 27: Materialflussdiagramm Kunststoffe und sonstige Rohstoffe der Energieverteilung _____	218
Abb. 28: Materialflussdiagramm mineralische Rohstoffe der Energieerzeugung ____	219
Abb. 29: Materialflussdiagramm metallische Rohstoffe der Energieerzeugung ____	220
Abb. 30: Materialflussdiagramm Kunststoffe und sonstige Materialien der Energieerzeugung _____	221

Tabellen

Tab. 1: Bauklassen unterschiedlicher Straßentypen	7
Tab. 2: Längen- und Flächenverteilung Gesamtstraßennetz in Deutschland (2007)	11
Tab. 3: Spezifische Materialkoeffizienten im Straßenbereich	12
Tab. 4: Materialbestand Straßennetz in Deutschland	12
Tab. 5: Materialbestand der Straßeninfrastruktur bei einer Straßenbreite von 4 m für Gemeindestraßen	13
Tab. 6: Materialbestand der Straßeninfrastruktur bei einer Straßenbreite von 7 m für Gemeindestraßen	14
Tab. 7: Durchschnittliche jährliche Veränderung der Straßenlängen 2001 bis 2008 in km	16
Tab. 8: Jährlicher Anstieg der Straßenfläche aus Neubau und Erweiterung	16
Tab. 9: Jährlicher Materialbedarf für Neubau und Erweiterung der Straßeninfrastruktur	17
Tab. 10: Jährlicher Materialbedarf für Wartung und Instandhaltung der Straßeninfrastruktur	18
Tab. 11: Verwendete Lebensdauer nach Straßentyp und Straßenschicht	18
Tab. 12: Brückenformen	21
Tab. 13: Errechnete mittlere Dimensionierung einer Brücke nach Brückentyp	21
Tab. 14: Materialbestand Straßentunnel	22
Tab. 15: Aufteilung der jährlich neu erbauten Brücken und Tunnel an Bundesfernstraßen	23
Tab. 16: Jährlicher Materialbedarf für den Neubau von Brücken und Tunneln der Bundesfernstraßen	23
Tab. 17: Gleislänge des deutschen Schienennetzes im Jahr 2007 (km)	25
Tab. 18: Aufteilung der Gleis-Kilometer nach Bauart	32
Tab. 19: Spezifische Materialkoeffizienten Bahnschwellen	33
Tab. 20: Spezifische Materialkoeffizienten Befestigung Schienen	34
Tab. 21: Spezifischer Materialkoeffizient Bahnschotter	34
Tab. 22: Spezifischer Materialkoeffizient Feste Fahrbahn	34
Tab. 23: Spezifischer Materialkoeffizient Bahnschienen	35

Tab. 24: Spezifischer Materialkoeffizient Oberleitungsmasten	36
Tab. 25: Spezifischer Materialkoeffizient Oberleitungsdraht	36
Tab. 26: Materialbedarf Unterwerke	37
Tab. 27: Spezifische Materialkoeffizienten Signaltechnik	37
Tab. 28: Spezifischer Materialbedarf Personenbahnhöfe	38
Tab. 29: Spezifischer Materialbedarf Güterbahnhöfe und Instandhaltungswerke	38
Tab. 30: Spezifischer Materialbedarf Eisenbahnbrücken	38
Tab. 31: Spezifischer Materialbedarf von Eisenbahntunneln	39
Tab. 32: Materialbestand Schieneninfrastruktur	39
Tab. 33: Entwicklung des Schienennetzes (km)	40
Tab. 34: Jährlicher Materialbedarf für Neu- und Ausbau der Schieneninfrastruktur	42
Tab. 35: Jährlicher Materialaufwand für Instandhaltung über technische Lebensdauer abgeleitet	43
Tab. 36: Jährlicher Materialaufwand für Instandhaltung abgeschätzt über jährlichen Ersatzbedarf	44
Tab. 37: Länge deutscher Binnenwasserstraßen 2005	48
Tab. 38: Materialbestand Kanalabdichtungen	49
Tab. 39: Materialbestand Uferbefestigungen an Wasserstraßen	49
Tab. 40: Materialbestand Schleusen	50
Tab. 41: Materialbestand Binnenhäfen	51
Tab. 42: Materialbestand Seehäfen	51
Tab. 43: Materialbestand Wasserstraßen in Deutschland	52
Tab. 44: Geplanter Neubau und Erweiterung von Schleusen	53
Tab. 45: Jährliche Materialflüsse Wasserstraßen durch Neubau und Erweiterung	54
Tab. 46: Nutzungsdauern der Anlageinfrastruktur Wasserstraßen	54
Tab. 47: Kumulierter Materialaufwand der Straßeninfrastruktur	56
Tab. 48: Kumulierter Materialaufwand der Brücken der Bundesfernstraßen	57
Tab. 49: Kumulierter Materialaufwand der Tunnel der Bundesfernstraßen	57
Tab. 50: Kumulierter Materialaufwand der Schieneninfrastruktur	58
Tab. 51: Kumulierter Materialaufwand der Wasserstraßeninfrastruktur	60
Tab. 52: Übersicht über den Materialbestand im Verkehr	62

Tab. 53: Übersicht über die jährlichen Flüsse für Neubau und Erweiterung der Verkehrsinfrastrukturen _____	63
Tab. 54: Übersicht über die jährlichen Flüsse für Instandhaltung der Verkehrsinfrastrukturen _____	64
Tab. 55: Talsperren nach Bauwerkstyp und Bauwerksvolumen _____	69
Tab. 56: Materialbestand Talsperren in Deutschland _____	70
Tab. 57: Neubauprojekte im Talsperren- / Speicherbau _____	72
Tab. 58: Jährliche durchschnittliche Zunahme Talsperren / Dämme durch Neubau _____	72
Tab. 59: Beispieldaten zur Materialintensität von Brunnen _____	74
Tab. 60: Verfahren der Grundwasseraufbereitung und erforderliche Anlagen _____	75
Tab. 61: Materialbestand Wasserwerke in Deutschland _____	77
Tab. 62: Größenverteilung Leitungsnetz in Deutschland (geschätzt) _____	78
Tab. 63: Materialverteilung Leitungsnetz 1999 (größenunabhängig) _____	79
Tab. 64: Materialbestand Armaturen im Leitungsnetz _____	80
Tab. 65: Materialbestand Sandbettung im Leitungsnetz _____	81
Tab. 66: Materialbestand Leitungsnetz in Deutschland _____	81
Tab. 67: Jährlicher Materialbedarf im Leitungsnetz durch Neubau _____	82
Tab. 68: Jährlicher Materialinput Leitungsnetz durch Netzerneuerung _____	83
Tab. 69: Jährlicher Materialoutput Leitungsnetz durch Netzerneuerung _____	84
Tab. 70: Größenverteilung Wasserspeicher in Deutschland (geschätzt) _____	86
Tab. 71: Materialbestand Wasserspeicher in Deutschland _____	86
Tab. 72: Jährlicher Materialbedarf Trinkwasserspeicher durch Neubau _____	87
Tab. 73: Jährliche Materialzunahme Trinkwasserspeicher durch Sanierung _____	88
Tab. 74: Größenverteilung und Querschnittsformen Kanalnetz (geschätzt) _____	95
Tab. 75: Materialverteilung Kanalnetz nach Größe geschätzt _____	96
Tab. 76: Materialbestand Kanalnetz in Deutschland 2007 _____	96
Tab. 77: Jährlicher Materialbedarf im Kanalnetz durch Neubau in Deutschland _____	97
Tab. 78: Anteile der unterschiedlichen Sanierungsverfahren im deutschen Kanalnetz _____	98
Tab. 79: Jährlicher Materialbedarf im Kanalnetz durch Sanierung (Renovierung und Erneuerung) _____	100
Tab. 80: Jährlicher Abbruch Kanalnetz in Deutschland durch offene Erneuerung _____	101

Tab. 81: Werkstoffverteilung der Schachtsysteme in % des gesamten Abwasserschachtbestandes _____	104
Tab. 82: Materialbestand Schächte in Deutschland 2007 _____	104
Tab. 83: Jährliche Zu- und Abgänge Kanalschächte durch Neubau und Sanierung _____	106
Tab. 84: Materialbestand Regenentlastungsanlagen nach Speichervolumen (geschätzt) _____	108
Tab. 85: Materialbestand Regenentlastungsanlagen in Deutschland 2007 _____	109
Tab. 86: Jährlicher Materialbedarf für Regenüberlaufbecken (RÜB) und Regenklärbecken (RKB) durch Neubau _____	110
Tab. 87: Kläranlagenbauwerke nach ihrem Zweck _____	111
Tab. 88: Kläranlagen in Deutschland nach Größenklassen und Kapazität 2007 _____	111
Tab. 89: Materialeinsatz für die Errichtung ausgewählter Kläranlagen in Deutschland und der Schweiz _____	112
Tab. 90: Materialeinsatz-Faktoren Beton und Stahl für Kläranlagen _____	112
Tab. 91: Materialeinsatz Kläranlage nach Reckerzügl 1997 _____	113
Tab. 92: Materialbestand Kläranlagen in Deutschland _____	113
Tab. 93: Materialbestand pro Kläranlage 2007 nach Größenklasse _____	114
Tab. 94: Jährliche Materialflüsse durch Neu- und Rückbau von Kläranlagen _____	115
Tab. 95: Kumulierter Materialaufwand der Wasserinfrastruktur _____	116
Tab. 96: Kumulierter Materialaufwand der Abwasserinfrastruktur _____	117
Tab. 97: Übersicht Materialbestand der Wasser- und Abwasserinfrastrukturen _____	120
Tab. 98: Jährliche Flüsse der Wasser- und Abwasserinfrastrukturen _____	121
Tab. 99: Stromnetz in Deutschland im Jahr 2008 _____	123
Tab. 100: Spezifischer Materialbedarf Erdkabel in t/km _____	125
Tab. 101: Spezifischer Materialbedarf Freileitungsdraht _____	126
Tab. 102: Dimensionierung und Anzahl an Freileitungsmasten _____	127
Tab. 103: Gewicht pro Freileitungsmast _____	127
Tab. 104: Materialbedarf für den Bestand an Freileitungsmasten _____	128
Tab. 105: Spezifischer Materialbedarf Transformatoren _____	128
Tab. 106: Materialbestand Stromnetz _____	129
Tab. 107: Investitionen der Netzbetreiber in das Stromnetz 2007 und 2008 _____	130
Tab. 108: Jährlicher Neubau und Erneuerung des Stromnetzes in km _____	131

Tab. 109: Jährlicher Materialbedarfe für den Aus- und Neubau des Stromnetzes abgeleitet aus den Daten von 1998-2008 _____	132
Tab. 110: Jährlicher Materialbedarf für die Erneuerung des Stromnetzes, abgeleitet aus den Daten von 1998-2008 _____	133
Tab. 111: Jährliche Menge an Abbruchmaterial aus Frei- und Kabelleitungen im Stromnetz, abgeleitet aus den Daten von 1998-2008 _____	134
Tab. 112: Spezifischer Materialbedarf des Gasfernleitungsnetzes _____	137
Tab. 113: Materialbestand des Fernleitungsgasnetzes _____	138
Tab. 114: Materialbestand des regionalen und örtlichen Erdgasnetzes _____	139
Tab. 115: Ausbau und Erneuerung des Gasnetzes _____	140
Tab. 116: Jährlicher Materialbedarf für Neu- und Ausbau im Ferngasnetz abgeleitet aus den Daten von 1998-2008 _____	141
Tab. 117: Jährlicher Materialbedarf für Neu- und Ausbau im Verteilungsnetz abgeleitet aus den Daten von 1998-2008 _____	141
Tab. 118: Materialverbrauch für die jährliche Erneuerung des Ferngasnetz in t abgeleitet aus den Daten von 1998-2008 _____	141
Tab. 119: Materialverbrauch für die jährliche Erneuerung des VNB abgeleitet aus den Daten von 1998-2008 _____	142
Tab. 120: Struktur des Fernwärmenetzes 1988 _____	146
Tab. 121: Verwendete Nenndurchmesser im Fernwärmenetz 1988 _____	147
Tab. 122: Struktur des Fernwärmenetzes in 2006 _____	147
Tab. 123: Materialbestand Fernwärmenetz in t _____	149
Tab. 124: Spezifischer Materialbedarf und Materialbestand von Nahwärmenetzen _	150
Tab. 125: Bestand an Kraftwerken in Deutschland _____	151
Tab. 126: Kraftwerkstypen _____	152
Tab. 127: Materialbestand der Steinkohlekraftwerke _____	154
Tab. 128: Materialbestand der Braunkohlekraftwerke _____	155
Tab. 129: Materialbedarf für den aktuellen Neubau von Kohlekraftwerken (3 BKW, 9 SKW) pro Jahr _____	157
Tab. 130: Jährlicher Materialbedarf für Instandhaltung, abgeleitet über die technische Lebensdauer von 40 Jahren _____	158
Tab. 131: Materialbestand der Gaskraftwerke in Deutschland _____	160
Tab. 132: Jährlicher Materialbedarf für Neubau und Instandhaltung von Erdgaskraftwerken _____	161

Tab. 133: Spezifischer Materialbedarf pro BHKW nach verschiedenen Leistungsklassen _____	163
Tab. 134: Materialbestand und jährlicher Materialbedarf für BHKW _____	164
Tab. 135: Materialbestand der deutschen Kernkraftwerke _____	165
Tab. 136: Jährlicher Materialbedarf für Instandhaltung, abgeleitet aus der technischen Lebensdauer _____	166
Tab. 137: Materialbestand Laufwasserkraftwerke Deutschland _____	169
Tab. 138: Jährlicher Materialbedarf für die Instandhaltung des Bestandes an LWK _____	171
Tab. 139: Materialbestand Windenergieanlagen in Deutschland _____	174
Tab. 140: Jährlicher Materialbedarf für den Zubau von Windenergieanlagen _____	176
Tab. 141: Jährlicher Materialbedarf für Repowering von Windenergieanlagen _____	177
Tab. 142: Jährliche Rückbaumengen an Windenergieanlagen im Rahmen von Repowering _____	178
Tab. 143: Materialbestand der Biogasanlagen (ohne BHKW) _____	181
Tab. 144: Jährlicher Materialbedarf für den Zubau von Biogasanlagen (ohne BHKW) _____	184
Tab. 145: Jährlicher Materialbedarf für Instandhaltung von Biogasablagen (ohne BHKW) _____	185
Tab. 152: Kumulierter Materialaufwand der Energieerzeugungsinfrastruktur _____	187
Tab. 153: Kumulierter Materialaufwand der Energieverteilungsinfrastruktur _____	188
Tab. 146: Übersicht über den Materialbestand der Energieerzeugung (in Tonnen) _____	190
Tab. 147: Übersicht über den Materialbestand der Energieverteilung (in Tonnen) _____	191
Tab. 148: Jährlicher Materialbedarf für den Neubau von Einrichtungen der Energieerzeugung _____	192
Tab. 149: Jährlicher Materialbedarf für den Neubau und Erweiterung der Energieverteilungsinfrastruktur _____	193
Tab. 150: Jährlicher Materialbedarf für die Instandhaltung der Energieerzeugungsinfrastruktur _____	194
Tab. 151: Jährlicher Materialbedarf für Instandhaltung Energienetze _____	195
Tab. 154: Übersicht über die erfolgten Berechnungen _____	197
Tab. 155: Jährliche Materialflüsse Wasserinfrastrukturen _____	207
Tab. 156: Jährliche Materialflüsse Abwasserinfrastrukturen _____	211

Tab. 157: Übersicht über den Materialbestand an mineralischen Rohstoffen_____	226
Tab. 158: Übersicht über den Materialbestand an metallischen Rohstoffen_____	227
Tab. 159: Übersicht über den Materialbestand an Kunststoffen und sonstigen Materialien_____	228
Tab. 160: Übersicht über den jährlichen Materialbedarf an mineralischen Rohstoffen für den Neu- und Ausbau _____	229
Tab. 161: Übersicht über den jährlichen Materialbedarf an metallischen Rohstoffen für Neu- und Ausbau _____	230
Tab. 162: Übersicht über den jährlichen Materialbedarf an Kunststoffen und sonstigen Rohstoffen für den Neu- und Ausbau_____	231
Tab. 163: Übersicht über den jährlichen Materialbedarf an mineralischen Rohstoffen für die Instandhaltung_____	232
Tab. 164: Übersicht über den jährlichen Materialbedarf an metallischen Rohstoffen für die Instandhaltung_____	233
Tab. 165: Übersicht über den jährlichen Materialbedarf an Kunststoffen und sonstigen Rohstoffen für die Instandhaltung _____	234
Tab. 166: Anteil des jährlichen Materialbedarfs der drei Infrastruktursysteme am Gesamtverbrauch bzw –produktion an ausgewählten Rohstoffen _____	235

Vorwort und Danksagung

Die Inhalte des vorliegenden Endberichtes sind in einer intensiven Zusammenarbeit einer Vielzahl von unterschiedlichen Personen entstanden:

Unser Dank geht an alle Experten verschiedenster wissenschaftlichen Einrichtungen für ihre inhaltlichen Hinweise und Ratschläge, sowie an die Mitarbeiter in unterschiedlichen Unternehmen der Wasser- und Abwasserwirtschaft, verschiedener Stadtwerke und Energieversorgern für die Bereitstellung von konkreten Netzdaten ihrer Unternehmen. Weiterhin möchten wir uns ganz herzlich beim BDEW für die zur Verfügung gestellte Zeit und internen Daten, sowie für die inhaltliche Diskussion bedanken.

Unser besonderer Dank gilt den Teilnehmenden des Experten-Workshops, die die umfangreichen Zwischenberichte im Vorfeld der Workshops innerhalb eines kurzen Zeitraums lesen mussten und im Workshop intensiv mit uns diskutiert haben. Sie gaben wichtige Anregungen und Impulse, die in die Projektergebnisse insgesamt und diese Veröffentlichung eingeflossen sind.

Weiterhin möchten wir uns bei Dr. Michael Scharp (IZT) für die nette Zusammenarbeit innerhalb des AS 2.3 „Infrastrukturen“ bedanken. Die Zusammenarbeit verlief in einer sehr angenehmen Atmosphäre.

Zudem bedanken wir uns für die umfangreiche Unterstützung durch Sabina Lischka und Martin Erren bei der Erstellung des ersten Zwischenberichtes. Louisa Lösing gebührt Dank für die Unterstützung während des Expertenworkshops.

Nicht zuletzt möchten wir uns ganz herzlich für die wertvollen und hilfreichen Kommentare und Anregungen von Dr. Stefan Bringezu (Projektleitung AP2, Wuppertal Institut) sowie von Frau Penn-Bressel und Frau Dickow-Hahn (Fachbegleitung Umweltbundesamt) bedanken.

Sören Steger und Miriam Fekkak

1 Einleitung

Die Errichtung und Erhaltung von Infrastruktursystemen benötigen jedes Jahr große Mengen unterschiedlicher Ressourcen. Infrastruktursysteme verfügen in der Regel über eine sehr lange Lebensdauer und haben damit neben ihren verschiedenen Funktionen auch den Charakter eines Rohstofflagers. Mit dem Wachstum dieses Materiallagers nimmt der Aufwand für die Unterhaltung der Systeme zu, auch wachsen die Menge der künftigen Abfallstoffe und damit zum einen der Aufwand für das Abfallmanagement und zum anderen das potenzielle Angebot von Sekundärrohstoffen.

Aufgabe von AS2.3 des MaRes-Projektes war es, relevante Infrastrukturen in Deutschland hinsichtlich ihres jährlichen Materialbedarfs für Instandhaltung und Neubau, sowie ihrer gespeicherten Materialien (Stoffdepots) zu analysieren. Aufbauend auf den gewonnenen Kenntnissen sollen erste Handlungsansätze zur Ressourcenschonung abgeleitet werden. Ziel ist ein nachhaltiges Ressourcenmanagement, das den Verbrauch an Primärrohstoffen absolut verringert und den Anteil an Sekundärrohstoffen erhöht. Dazu ist die Schaffung einer konsistenten Datengrundlage von elementarer Bedeutung.

Ver- und Entsorgungssysteme sind neben Verkehrssystemen Bestandteil der technisch-materiellen Infrastruktur¹ und damit Teil der stetig wachsenden Technosphäre (Bringezu 2000, 1). Sie sind gekennzeichnet durch eine weitgehende Leitungsgebundenheit der Transporteinrichtungen (Rohrnetz, Freileitung, Kabel) sowie die Standortgebundenheit der Anlagen (Wasserbehälter, Kläranlagen, Kraftwerk, Funkmast).

Die Netzinfrastuktur wächst bislang mit der Siedlungsentwicklung durch Ausbau und Erweiterung. Kennzeichnend sind hohe Investitionen sowohl in die Einrichtung als auch die Instandhaltung, lange Planungszeiträume und Bauzeiten (Tietz 2005). Bedingt durch die hohen Fixkosten und, damit verbunden, eine notwendige hohe Kapazitätsauslastung haben sich in der Vergangenheit zentrale Strukturen der Ver- und Entsorgung herausgebildet, um mögliche ökonomische Größenvorteile zu erzielen. Diese zentralen Strukturen bedeuten allerdings auch ein starkes Beharrungsvermögen und eine gewisse Inflexibilität bei der Anpassung an geänderte Rahmenbedingungen (z.B. demographischer Wandel). Ein weiteres wesentliches Merkmal der Infrastruktursysteme ist ihre hohe Langlebigkeit: Wasserrohre z.B. haben eine Nutzungsdauer von bis zu 100 Jahren.

Anhand des Kriteriums „Netzgebundenheit“ wurden folgende Infrastruktursysteme ausgewählt und innerhalb von MaRes AS2.3 untersucht:

- Verkehrsnetze,
- Trink- / Abwassernetze,

¹ Im Gegensatz zur technischen Infrastruktur werden unter sozialer Infrastruktur soziokulturelle Einrichtungen wie Bildung, Kultur, Gesundheit und Freizeit subsumiert (Tietz 2006: 7), die hier nicht betrachtet werden

- Telekommunikations-Netze (Festnetz, Mobilfunk), externer Endbericht (Scharp 2010),
- Elektrizitäts-, Gas- und Fernwärmenetze (inkl. Energieerzeugungsinfrastruktur).

2 Methodische Vorgehensweise

MaRes AS2.3 gliederte sich in 4 Projektphasen, die aufeinander aufbauend von 2007 bis 2010 bearbeitet wurden. In Projektphase 1 wurden zunächst die relevanten Bestandteile der einzelnen Infrastruktursysteme nach Funktionsweise und Aufbau beschrieben. Ziel der ersten Projektphase war eine Einschätzung, welche Teile der betrachteten Infrastruktursysteme von ihrer Bedeutung für den Gesamtressourcenbedarf im System relevant sind (sowohl im Bestand als auch in ihren jährlichen Stoffflüssen).

Die Auswahl der für die weitere Analyse relevanten Infrastrukturtypen basierte auf einer vergleichenden Einschätzung der Relevanz der verschiedenen Infrastruktursysteme, welche jeweils anhand verschiedener Kriterien abgeleitet wurden. Die zu diesem frühen Projektzeitpunkt vorhandenen Daten ließen allerdings nur eine grobe Abgrenzung in fünf Stufen von ++ (sehr hoch/sehr gut), + (hoch/gut), 0 (durchschnittlich), - (gering/schlecht) bis -- (sehr gering/sehr schlecht) zu. Folgende Kriterien dienten zur Auswahl der Referenzsysteme:

- **Bedeutung als Materiallager:** hier wurde die mögliche Größenordnung der gebundenen Materialien je Infrastrukturbestandteil abgeschätzt. Die Angaben basierten zum Großteil auf ersten Schätzungen im möglichen Bereich von Zehnerpotenzen;
- **Mögliche jährliche Erneuerungsrate:** eine vorläufige Abschätzung der vermuteten Größenordnung möglichst im langjährigen Mittel. Eine Annäherung erfolgte zum einen über die Lebensdauer der Infrastruktureilbereiche und zum anderen über die vermutete Altersstruktur;
- **Möglicher Sanierungsbedarf:** der geschätzte mögliche Sanierungsbedarf in den nächsten zehn Jahren. Aus unterschiedlichen Gründen kann die Nutzungsdauer weit über die Lebensdauer hinausreichen und einen Sanierungsstau verursachen. Teilweise sind Bauteile auch schon weit vor Ende der angegebenen Lebensdauer sanierungsbedürftig;
- **Möglicher Erweiterungsbedarf:** eine Abschätzung des Wachstums des Bestandes in den nächsten zehn Jahren;
- **Hauptbestandteile:** listete die mengenmäßig bedeutsamsten Materialkomponenten;
- **Möglicher Anteil Recycling:** eine Abschätzung des möglichen Anteils von für ein Recycling potenziell wertvollen Materialien. Da ein künftiges Recycling sehr von

den zukünftig verfügbaren Technologien und einer Reihe weiterer Faktoren abhängt, konnte hier nur eine Schätzung vorgenommen werden.

- **Relevanz:** abgeleitet aus den Ergebnissen zu den oben genannten Kriterien erfolgte hier eine Abschätzung der potenziellen Relevanz für das Gesamtsystem;
- **Datenverfügbarkeit:** eine Klassifizierung der Datensituation nach bisherigem Kenntnisstand;
- **Empfehlung:** Abgeleitet aus der möglichen Relevanz und der Datenverfügbarkeit wurde eine Empfehlung zur vertieften Analyse des Infrastrukturtyps in Phase 2 und 3 ausgesprochen und mit dem Projektgeber Umweltbundesamt (UBA) abgestimmt.

Schon in der ersten Projektphase wurde deutlich, dass die Datensituation für die Infrastruktur der Festnetztelefonie als äußerst schwierig eingeschätzt werden musste. Diese Probleme blieben im Projektverlauf bestehen, so dass in Abstimmung mit dem UBA beschlossen wurde, die Abschätzung des Materiallagers und der jährlichen Materialbedarfe für die IuK-Infrastruktur in diesem Projekt nicht weiter zu verfolgen. Die Arbeiten des IZT in MaRes AS2.3. zum Bereich der Mobilfunk-Infrastruktur wurden allerdings fortgesetzt. Auf Grund der notwendigen unterschiedlichen Methodologie und unzureichenden Datenqualität im Bereich Mobilfunk wurden die Projektergebnisse für die Mobilfunkinfrastruktur in einem separaten Endbericht (Scharp 2010) dokumentiert.

Die zweite Projektphase hatte zum Ziel, die in Phase 1 identifizierten Referenzsysteme hinsichtlich ihres Gesamtbestandes und der in ihnen gebundenen Ressourcen zu analysiert und abzuschätzen. In dieser Projektphase wurde zunächst nur der direkte Materialbedarf erhoben. Das heißt, dass die anfallenden Materialien der Vorketten oder wirtschaftlich ungenutzte Ressourcen, die mit den direkten Materialbedarfen assoziiert sind, erst in der vierten Projektphase mit geschätzt wurden.

Aufbauend auf den Recherchen der ersten Projektphase wurde zunächst die jeweilige Bestandslänge der einzelnen Netze (Länge der Gleisinfrastruktur etc.) bzw. Anzahl der verschiedenen Referenzsysteme (Anzahl an Kläranlagen, unterteilt nach Größenkategorien etc.) ermittelt. Anschließend wurde der Materialbedarf pro km Netzlänge bzw. pro einzelnes Referenzsystem ermittelt. Dabei wurde, wenn möglich, sehr differenziert vorgegangen. So ist z.B. die Länge des Gasnetzes je nach Druckstufe in verschiedene typische Rohrdurchmesser unterteilt. Oder der Bestand an Windenergieanlagen (WEA) wurde entsprechend der vorhandenen Anlagentypen je nach Leistungsklasse sehr genau hochgerechnet. In anderen Infrastrukturbereichen lagen diese Informationen jedoch nicht vor, so dass dort mit Durchschnittswerten der Gesamtbestand abgeschätzt werden musste. So liegen z.B. keine umfassenden Daten über die Größe und Ausstattung der Biogasanlagen in Deutschland vor.

Der Materialbedarf pro km Netzlänge bzw. pro Referenzsystem wurde mit Hilfe umfassender Literaturrecherchen verschiedenster technischer Handbücher, Fachartikel, technischer Normen und Ökobilanzierungen ermittelt. Weiterhin wurden Hersteller direkt kontaktiert und befragt sowie die Daten von Experten hinsichtlich der Plausibilität eingeschätzt.

In der dritten Projektphase wurden, ergänzend zu den Daten der Stofflager im Bestand, die jährlichen Materialflüsse für den Ausbau und die Erweiterung sowie für die Instandhaltung abgeschätzt. Die jährlichen Instandhaltungen können grundsätzlich in Maßnahmen zum Austausch vorhandener Infrastrukturen als auch Maßnahmen der Wartung und Reparatur unterschieden werden. Während bei Ersatzinvestitionen ein vollständiger Austausch der Infrastrukturbestandteile unterstellt werden kann, deren Neubau häufig mit einem hohen Ressourcenaufwand verbunden ist, können Maßnahmen der Wartung und Reparatur deutlich ressourcensparender sein.²

Allerdings liegen für die konkreten Aufwendungen für Instandhaltung häufig keinerlei Daten vor, so dass der Instandhaltungsbedarf, wie in Ökobilanzierungen üblich, über die jährliche Abschreibung der technischen Lebensdauer erfolgt. Damit wird unterstellt, dass ein Referenzsystem (z.B. ein Kraftwerk) nach dem Erreichen der Lebensdauer komplett neu erstellt wird. Über die jährliche Abschreibung fallen damit rechnerisch jedes Jahr identische Instandhaltungsaufwendungen an. Dies ist insofern eine vereinfachende Annahme, als bestimmte Bauteile wie beispielsweise Turbinen zwei bis dreimal innerhalb der Betriebsdauer des Kraftwerks ausgewechselt werden, während an der Bautechnik über den kompletten Zeitraum nur geringe Austausche stattfinden. Mit der pauschalen Berechnung des Einmalaustausches der gesamten Anlage wird der Aufwand im Hinblick auf die Reparaturen tendenziell unterschätzt. Das betrifft insbesondere Maschinenteile und metallische Materialien mit Ausnahme des Bewehrungsstahls. Durch die Annahme des vollständigen Ersatzes kann es aber auch zu einer Überschätzung bzw. Doppelzählungen kommen, wenn bei neuen Anlagen nicht zwischen Ersatzneubauten und erstmaligem Neubau unterschieden werden kann, bzw. die Neubauten materialeffizienter ausgelegt werden.³

Künftige Untersuchungen sollten die Altersstruktur der Infrastrukturen und ihrer Bestandteile daher detaillierter erfassen, um eine Dynamisierung der Bestandsschätzung zu ermöglichen. Dies war in diesem Projekt nicht vorgesehen. Mit der Definition der Stoffflüsse für Instandhaltung als Austausch verbrauchter Infrastrukturbestandteile und der kontinuierlichen Abschreibung über die technische Lebensdauer müssen den Inputflüssen für Instandhaltung entsprechende Abbruchmengen gegenüberstehen. Für einzelne Infrastrukturbereiche, in erster Linie Infrastrukturen der Wasser- und Gasnetze, haben sich allerdings die genutzten Materialien in den letzten Jahren stark in Richtung PE-Kunststoff verändert, während früher genutzte Materialien wie Grauguss nicht mehr zum Einsatz kommen. Für diese Infrastrukturbereiche wurde der Instandhaltungsaufwand nicht über die technische Lebensdauer abgeschätzt, sondern z.B. über Investitionszahlen und Angaben zu Netzerneuerungsraten.

² Z.B. können in beschädigte Rohrleitungen sogenannte Inlays aus Kunststoff eingezogen werden, die danach eine neue Innenhülle im Rohr bildet. Somit ist ein Austausch des kompletten Rohres häufig nicht mehr notwendig.

³ Um Überschätzungen und Doppelzählungen zu vermeiden wurden deshalb in den Infrastrukturbereichen die gespeicherten Massen in Gebäuden (Bahnhöfe, Kraftwerke) bzw. Einrichtungen, für die eine kontinuierliche Renovierung nicht plausibel erscheint (z.B. Fermenter von Biogasanlagen), nur mit 10 % in die jährliche Abschreibung über die Lebensdauer einbezogen.

Die jährlichen Materialflüsse für den Ausbau und die Instandhaltungsmaßnahmen wurden nicht für alle Referenzsysteme durchgeführt. So wurden z.B. für die Wärmenetze aufgrund mangelnder Daten oder vernachlässigbarer Mengen keine jährlichen Materialflüsse ermittelt. Weiterhin waren keine Daten für die Erweiterung der Wasserkraftwerke vorhanden, so dass dort nur der Instandhaltungsaufwand über die technische Lebensdauer abgeschätzt wurde. Aus verschiedenen Literaturangaben konnte für Windenergieanlagen (WEA) ein geringer Wartungsaufwand abgeleitet werden. Zusammen mit dem geringen Alter des Großteils der WEA wurde keine Abschätzung der Materialströme für die reguläre Instandhaltung vorgenommen. Allerdings wurden die anfallenden Materialflüsse im Rahmen von Repowering-Maßnahmen von WEA ermittelt.

Die Ergebnisse der Projektphasen 1 bis 3 wurden zu Beginn des Jahres 2010 auf einem Expertenworkshop vorgestellt und umfassend diskutiert. Abweichende Einschätzungen von Experten wurden im Anschluss überprüft und in der Überarbeitung der Projektergebnisse berücksichtigt. Neben dieser Überarbeitung der Bestandsmengen und der jährlichen Materialflüsse für Neubau und Instandhaltung wurden in der vierten Projektphase zum einen der kumulierte Materialaufwand für die einzelnen Infrastruktursysteme abgeschätzt und zum anderen die Projektergebnisse in Form von Materialflussdiagrammen visualisiert. In den Materialflussdiagrammen ist neben dem Bestand und den jährlichen Materialflüssen in das Infrastruktursystem auch die Menge und die Art der Behandlung bzw. Verwendung der Stoffflüsse aus dem Infrastruktursystem mit abgebildet. Über diese Abbruchmassen und ihre Behandlung liegen häufig nur wenige Informationen vor, so dass wir an dieser Stelle häufig mit Annahmen arbeiten müssen. Das systematische Zusammenführen der vorliegenden Ergebnisse und die Benennung der Datenlücken dienen gleichzeitig zur Verdeutlichung des weiteren Forschungsbedarfs. Mit dem vorliegenden Bericht wird erstmals eine umfassende und konsistente Datengrundlage für den Infrastrukturbestand in Deutschland mit seinen Stofflagern und den notwendigen jährlichen Materialaufwendungen zu Ausbau und Instandhaltung der technischen-netzgebundenen Infrastrukturen erstellt.

3 Verkehrsinfrastruktur

3.1 Straßeninfrastruktur

Nach Angaben des Statistischen Bundesamtes betrug im Jahr 2009 die Gesamtlänge des deutschen Straßennetzes 690.999 km, unterschieden nach Straßen des überörtlichen Verkehrs – Bundesautobahnen (12.645 km), Bundes- (40.203 km), Landes- (86.528 km) und Kreisstraßen (91.623 km) – sowie geschätzten⁴ 460.000 km Gemeindestraßen (Destatis 2010, Destatis 2006). Gemeindestraßen bilden somit rund zwei Drittel des Gesamtnetzes. Die Gesamtlänge der überörtlichen Straßen ist in den letzten Jahren leicht rückläufig (von 231.400 km im Jahr 2003 auf 230.999 km in 2009). Dabei war für die Bundesautobahn und Kreisstraßen ein Anstieg der Länge zu verzeichnen, während der Bestand an Bundes- und Landesstraßen zurückging.⁵ Eine weitere Tendenz ist der Ausbau zu breiteren Straßen. So nahm der Anteil der einbahnigen und zweibahnigen Autobahnen mit bis zu vier Fahrstreifen ab und zweibahnige Autobahnen mit mehr als vier Fahrstreifen dominieren das Gesamtbild inzwischen. Diese Tendenz lässt sich auch bei den Bundesstraßen erkennen.

Neben dem Neu- und Ausbau von Straßen wird ein erheblicher Aufwand betrieben, die bestehenden Straßen instand zu halten.

3.1.1 Straßenaufbau

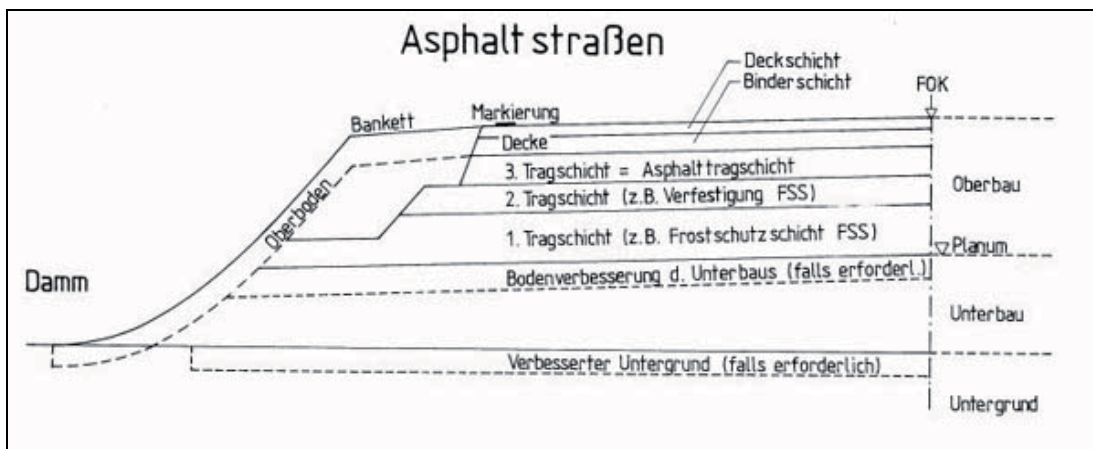
Der Aufbau einer Straße lässt sich in drei Ebenen aufteilen: Dem Untergrund folgen der Unter- und Oberbau.

Der Unterbau wird je nach Untergrund künstlich hergestellt. Dem Unterbau folgen Tragschichten wie z.B. Frostschutzschicht und Asphalttragschicht und die Straßendecke. Zusammen ergeben diese Schichten den Oberbau. Der Oberbau ist in Deutschland genormt und kann daher gut erfasst werden. Der Aufbau einer Asphaltstraße ist exemplarisch in der folgenden Grafik dargestellt.

⁴ Die Gemeindestraßen werden seit Beginn der 90er Jahre statistisch nicht mehr erfasst. Es gibt daher nur Schätzungen zur Länge der Gemeindestraßen.

⁵ Die Veränderungen können sowohl real durch Zu- und Rückbau erfolgen als auch durch eine Neuklassifizierung der Straßen. Dies ist aus den vorhandenen Daten statistisch nicht unterscheidbar.

Abb. 1: Querschnitt einer Asphaltstraße



Quelle: Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, Arbeitsgruppe „Asphaltstraßen“ (2001)

Besonders hilfreich für die stoffliche Bewertung der Straßen in Deutschland ist die vorgegebene Einteilung nach Straßenarten und Bauklassen. Nach den „Richtlinien für die Standardisierung des Oberbaues von Verkehrsflächen“ (RStO) werden in Deutschland folgende Straßentypen den verschiedenen Bauklassen zugeordnet:

Tab. 1: Bauklassen unterschiedlicher Straßentypen

Straßenart	Bauklasse
Schnellverkehrsstraße, Industriesammelstraße	SV/I/II
Hauptverkehrsstraße, Industriestraße, Straße im Gewerbegebiet	II/III
Wohnsammelstraße, Fußgängerzone mit Ladeverkehr	III/IV
Anliegerstraße, befahrbarer Wohnweg, Fußgängerzone (ohne Busverkehr)	V/VI

Quelle: Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, Richtlinien für die Standardisierung des Oberbaues von Verkehrsflächen (2001)

Neben dieser Einteilung kann weiter nach der Deckschicht der Straße unterschieden werden. Es gibt Asphalt-, Beton- und Pflasterstraßen, wobei die Pflasterstraßen überwiegend nur noch als Altbestände in ländlichen Räumen oder als Stilelement in historischen Innenstädten eine Rolle spielen dürften.

Abhängig von den örtlichen Verhältnissen unterscheiden sich die Tragschichten einer Straße ebenfalls. Einflussfaktoren sind z.B. Witterungsverhältnis, Erneuerungsstrategie des Betreibers, regional vorhandenes Material, Verkehrsaufkommen und die Topographie des Baugeländes. Diese Faktoren lassen nur eine ungefähre und grobe Abschätzung des gebundenen Materials zu.

Eine Zuordnung von Baustoffen für die jeweiligen Straßenschichten ist zum Teil möglich:

- Betondecken bestehen aus Mineralstoffgemischen und Zement sowie weiteren Zusätzen. Die Zusammensetzung variiert je nach Ansprüchen und Auftragnehmer (DIN 1045).
- Asphalttschichten bestehen aus Mineralstoffen mit feiner Gesteinskörnung (Füller, Natursand, Edelbrechsand und Edelsplitt) und Straßenbaubitumen.
- Pflasterdecken bzw. Pflastersteine bestehen im Allgemeinen aus Beton, Klinker oder Naturstein. Die Ausführungen werden nach der ZTV P-StB gehandhabt.

Frostschutzschichten sollen Frostschäden im Oberbau verhindern und bestehen aus frostunempfindlichen Baustoffgemischen, die aufgrund ihrer Eigenschaften auch im verdichteten Zustand wasserdurchlässig bleiben. Zu nennen sind: Kiese, Kies- Sandgemische, Sande, Sand-Kies-Gemische (DIN 18196), Gemische aus Splitt und Brechsand der Lieferkörnung 0/5 bis 0/32 sowie Gemisch aus Schotter, Splitt und Brechsand der Lieferkörnung 0/45 und 0/56 (ZTV T-StB 95).

Schottertragschichten bestehen aus Schotter-Splitt-Sand-Gemischen (Lieferkörnung 0/45 oder 0/56) oder aus Splitt-Sand-Gemischen (Lieferkörnung 0/32, 0/45, 0/56) (DIN 18315, ZTV T-StB 95).

Kiestragschichten bestehen aus Kies-Sand-Gemischen (Lieferkörnung 0/32, 0/45, 0/56), gegebenenfalls unter Zusatz von gebrochenem Material (DIN 18315, ZTV T-StB 95).

Hydraulisch gebundene Tragschichten (HGT) bestehen aus ungebrochenen und/oder gebrochenen Mineralstoffen sowie hydraulischen Bindemitteln (Baukalk, Zement, sonstige). Die Bindemittelmenge darf jedoch 3,0 Massenprozent, bezogen auf das trockene Mineralstoffgemisch, nicht unterschreiten.

Baustoffe

Anhand der Beschreibung der einzelnen Schichten wird deutlich, dass als Hauptbaustoffe die Mineralstoffe Sand, Kies, Schotter und Splitt für den Straßenbau zum Einsatz kommen. Weiter werden Bindemittel wie Zement, Kalk und Bitumen verwendet. Industrielle Nebenprodukte kommen ebenfalls zum Einsatz.

Die Mineralstoffe oder Gesteinskörnungen können natürlich, künstlich oder recycelt sein. Sie stellen den größten Anteil des Ressourceninputs dar. Genaue Angaben für die verwendeten Mineralstoffe finden sich in den „Technischen Lieferbedingungen für Mineralstoffe im Straßenbau“ (Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, TL Min-StB 2000) oder den „Technischen Lieferbedingungen für Gesteinskörnungen“.

gen im Straßenbau“ (Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, TL Gestein-StB).⁶

Künstliches Gestein entstammt thermischer oder sonstiger industrieller Behandlung. Beispiele sind z.B. Eisenhüttenschlacke, Metallhüttenschlacke, Steinkohleflugasche, Kesselasche. Viele weitere Produkte kommen zum Einsatz.

Die einzelnen Baustoffe werden als Gemische zu verschiedenen Anteilen im Straßenkörper verbaut. Die Zusammensetzung dieser Mineralstoffgemische kann aus den Anforderungen an die Korngrößenverteilung bestimmt werden. Ein Großteil dieser wird über die „Zusätzlichen Technischen Vertragsbedingungen“ (ZTV'en) festgelegt und kann über Tabellen zur Verteilung in Massenprozent ermittelt werden.

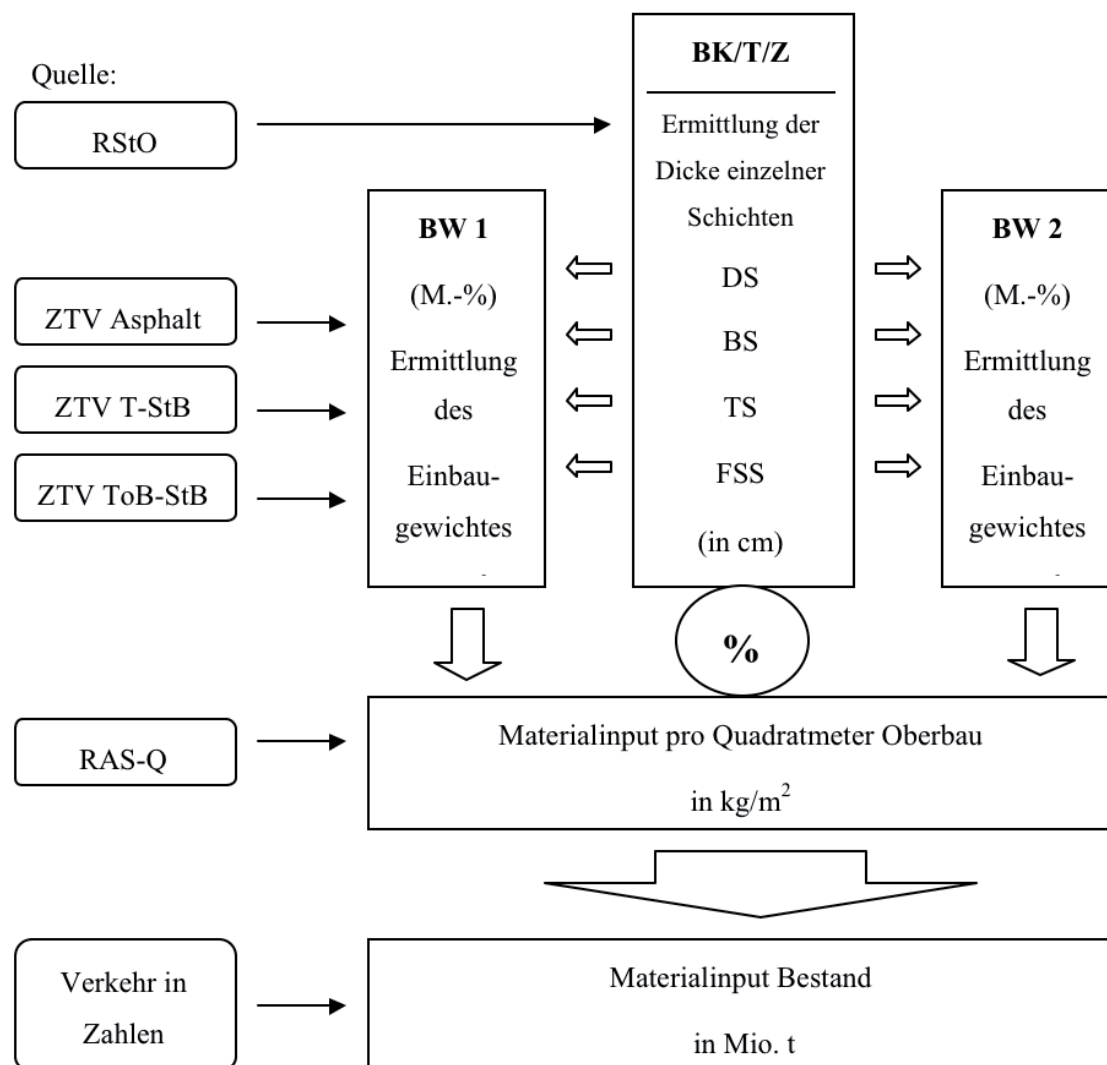
Straßenbestand

Zur weiteren Quantifizierung der in der Straßeninfrastruktur gebundenen Baustoffe, ist eine Einteilung der Straßen nötig. Neben den oben genannten Bauklassen, hilft hierbei die „Richtlinie für die Anlage von Straßenteil: Querschnitte“ (RAS-Q). Es können Regelquerschnitte zugeordnet werden, so dass sich vereinfacht folgendes Bild ergibt:

- Autobahnen (Bauklasse (BK) SV, Regelquerschnitt (RQ) 29,5),
- Bundesstraßen (BK I, RQ 26),
- Landesstraßen (BK II, RQ 10,5),
- Kreisstraßen (BK III, RQ 9,5),
- Gemeindestraßen (BK IV, RQ 7,5).

⁶ Die Regelwerte werden regelmäßig überarbeitet und aktualisiert. Einige der Regelwerke die in dieser Studie verwendet werden (z.B. FGSV 697 oder FGSV 799 sind mittlerweile veraltet. Da aber der Großteil des Straßenbestandes noch nach altem Regelwert erbaut wurde, ist es zulässig, die zum Teil veralteten Regelwerte zur Berechnung des Materialbestandes zu verwenden.

Abb. 2: Schema zur Abschätzung des Straßenbestandes (nach Ulbricht 2006)



Abkürzungen:

BK/T/Z	Bauklasse/Tabelle/Zelle der RStO	TS	Tragschicht
BW	Bauweise	FSS	Frostschutzschicht
DS	Deckschicht	BAB	Bundesautobahnen
BS	Binderschicht	%	prozentuale Verteilung der Deckschichtarten

3.1.2 Materialbestand der Straßeninfrastruktur

Nach den „Richtlinien für die Anlage von Straßen, Teil: Querschnitte“ (RAS-Q) werden verschiedene Möglichkeiten der Bauausführung festgelegt. Der Regelquerschnitt bezieht sich dabei auf die komplette Straße und wurde auf die tatsächlich befahrene Breite reduziert. Damit wird berücksichtigt, dass Rand- und Mittelstreifen nicht zur unterbauten Fläche zählen.

Insgesamt ergibt sich eine unterbaute Straßenfläche in Deutschland von 4.437 km² (Tab. 2).

Tab. 2: Längen- und Flächenverteilung Gesamtstraßennetz in Deutschland (2007)

Straßenkategorie	Länge (km)	Breite (m)	Fläche (km ²)
Bundesautobahnen	12.531		306,03
1-bahnig	151	7,5	1,13
2-bahnig mit bis zu 4 Fahrstreifen	9.021	23	207,48
2-bahnig mit mehr als 4 Fahrstreifen	3.359	29	97,41
Bundesstraßen	40.711		351,18
mit bis zu 2 Fahrstreifen	37.043	7,5	277,82
mit mehr als 2 Fahrstreifen	3.668	20	73,36
Landesstraßen	86.597	7,5	649,48
Kreisstraßen	91.520	6,5	594,88
Straßen des überörtlichen Verkehrs	231.359		1.901,57
Gemeindestraßen	460.000	5,5	2.530,00
Gesamt	691.359		4.431,57

Quellen: Destatis (2008a); Destatis (2006); Destatis (2005a); BMV (2005); Adler (2004); RAS-Q

Als Grundlage für die Quantifizierung der in der bestehenden Straßeninfrastruktur eingebauten Materialien wurden Regelwerke für den Straßenbau herangezogen. Hierbei wurde für das ganze Bundesgebiet eine einheitliche Umsetzung der wichtigsten Normen über die Baustoffe und die Bauausführung angenommen, was abhängig von der Komplexität der örtlichen Verhältnisse nicht immer der Fall ist.

Der Aufbau einer Straße lässt sich in drei Ebenen aufteilen: Dem Untergrund folgen der Unter- und Oberbau. Der Oberbau – bestehend aus Frostschutzschicht, Asphalttragschicht und Straßendecke – ist in Deutschland genormt und kann daher gut erfasst werden. Dabei erfolgt eine weitere Aufteilung der Straßenkategorien nach der Deckschicht der Straße. Es gibt Asphalt-, Beton- und Pflasterstraßen.

Als zentraler Baustein wurde zunächst, anhand der RStO⁷ und den für die Referenzstraßen festgelegten Bauklassen, die vorzusehende Schichtdicke innerhalb der einzelnen Bauweisen ermittelt. Die Auswahl der Bauweise erfolgte dabei, soweit vorhanden,

⁷ Nach den „Richtlinien für die Standardisierung des Oberbaues von Verkehrsflächen“ (RStO) können die Bauklassen je nach Art der zu erwartenden Beanspruchung unterteilt werden.

mittels statistischer Erhebungen (Rübensam et al. 2005; Buchert et al. 2004). Alternativ wurde zu je gleichen Anteilen (i) Asphalttragschicht auf Frostschuttschicht sowie (ii) Asphalttragschicht mit Kies- oder (iii) Schottertragschicht auf Frostschuttschicht angenommen, womit die wesentlichen Bauweisen erfasst sind.

Für die festgelegten Schichtdicken wurde dann anhand der ZTVen (Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen und Richtlinien der Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen) ein Einbaugewicht berechnet. Auch die Zusammensetzung der Baustoffgemische und die verwendeten Bindemittel in Massenprozent sind den ZTVen zu entnehmen.⁸ Unter Zusammenführung der Daten kann das für den Quadratmeter Oberbau notwendige Baumaterial bestimmt werden.

Tab. 3: Spezifische Materialkoeffizienten im Straßenbereich

Material (kg/m²)	BAB	BS	LS	KS	GS
Gesteinsmehl (Füller)	53,3	57,5	38,4	38,4	23,3
Edelbrechsand	73,7	106,8	78,6	78,6	48,9
Edelsplitt	445,0	495,3	405,8	405,8	193,7
bituminöse Bindemittel	19,8	29,8	25,8	25,8	13,5
hydraulische Bindemittel	45,2				2,3
Sand	516,3	497,6	521,2	467,2	530,3
Kies	647,5	605,0	641,3	575,3	511,3
Schotter			68,5	68,5	219,2
Summe Oberbau	1.800,9	1.792,0	1.779,6	1.659,6	1.542,6

Quelle: Eigene Berechnungen auf Grundlage von Ulbricht (2006)

Über die ermittelten Netzlängen wurde schließlich eine Quantifizierung des gesamten Materialbestandes im Straßennetz in Deutschland vorgenommen. Insgesamt ergibt sich ein Materialbestand im gesamtdeutschen Straßennetz wie folgt:

Tab. 4: Materialbestand Straßennetz in Deutschland

Material (1.000 t)	BAB	BS	LS	KS	GS	Summe
Anteil am Gesamtnetz (km)	12.531	40.711	86.597	91.520	460.000	691.359
Gesteinsmehl (Füller)	16.310	20.186	24.923	22.828	59.026	143.272
Edelbrechsand	22.562	37.500	51.045	46.754	123.635	281.497
Edelsplitt	136.189	173.946	263.574	241.417	490.124	1.305.251
bituminöse Bindemittel	6.064	10.466	16.748	15.340	34.030	82.648
hydraulische Bindemittel	13.829	0	0	0	5.907	19.736
Sand	158.010	174.759	338.525	277.944	1.341.720	2.290.957
Kies	198.144	212.465	416.532	342.254	1.293.711	2.463.106
Schotter	0	0	44.489	40.749	554.576	639.814
Summe Oberbau	551.108	629.322	1.155.836	987.286	3.902.729	7.226.281

Quelle: Eigene Berechnungen auf Grundlage von Ulbricht (2006)

⁸ Sind keine Einbaugewichte vorgeschrieben (z.B. Frostschuttschicht), wurden diese über die Baustoffdichte bzw. die Einbaudichte ermittelt.

Als Hauptbaustoffe kommen die Mineralstoffe Sand, Kies, Schotter sowie Splitt zum Einsatz. Weiter werden Bindemittel wie Zement (in der Regel Portlandzement nach DIN EN 197-1) und Kalk (beides hydraulische Bindemittel) oder Bitumen zur Herstellung von Asphalt bzw. Beton verwendet. Zunehmend kommen auch industrielle Nebenprodukte zum Einsatz, welche in großer Vielfalt und damit schwer differenzierbar Verwendung finden (Ulbricht 2006).

Sensitivitätstest

In der Diskussion mit Straßenbau-Experten wurde deutlich, dass die angenommene Straßenbreite, gerade bei Gemeindestraßen, häufig nicht den aktuellen Normen entspricht. Gerade der Bestand an älteren Straßen ist häufig deutlich weniger als 5,5 m breit. Der hohe Anteil der Gemeindestraßen am Gesamtstraßennetz lässt den Materialbestand sensitiv auf die angenommene Breite der Straßen reagieren. Um die Spannbreite der unterschiedlichen Ergebnisse abzuschätzen, wurde der Materialbestand der Straßeninfrastruktur mit einer Untergrenze von 4 m Straßenbreite sowie einer Obergrenze von 7 m Straßenbreite berechnet.

Tab. 5: Materialbestand der Straßeninfrastruktur bei einer Straßenbreite von 4 m für Gemeindestraßen

Input	BAB	BS	LS	KS	GS	Summe
km	12.531	40.711	86.597	91.520	460.000	691.359
(Neubau)	in 1.000 t	in 1.000 t	in 1.000 t	in 1.000 t	in 1.000 t	in 1.000 t
Gesteinsmehl (Füller)	16.310	20.186	24.923	22.828	42.928	127.174
Edelbrechsand	22.562	37.500	51.045	46.754	89.917	247.778
Edelsplitt	136.189	173.946	263.574	241.417	356.454	1.171.581
bit. Bindemittel	6.064	10.466	16.748	15.340	24.749	73.367
hydr. Bindemittel	13.829	0	0	0	4.296	18.125
Sand	158.010	174.759	338.525	277.944	975.796	1.925.033
Kies	198.144	212.465	416.532	342.254	940.881	2.110.276
Schotter	0	0	44.489	40.749	403.328	488.566
Summe Oberbau	551.108	629.322	1.155.836	987.286	2.838.348	6.161.901

Quelle: Eigene Berechnungen auf Grundlage von Ulbricht (2006)

Je nach Straßenbreite schwankt der Materialbestand zwischen 6,2 Mrd. Tonnen (4 m) und 8,3 Mrd. Tonnen (7 m). Gleichzeitig wird ersichtlich, dass eine Reduzierung der Straßenbreite um 1 m im Gesamtbestand der Gemeindestraßen rechnerisch 0,7 Mrd. Tonnen weniger mineralische Rohstoffe bedeuten würden, eine Menge, die nach ihrer Einsatzdauer nicht ersetzt werden müsste.

Tab. 6: Materialbestand der Straßeninfrastruktur bei einer Straßenbreite von 7 m für Gemeindestraßen

Input	BAB	BS	LS	KS	GS	Summe
km	12.531	40.711	86.597	91.520	460.000	691.359
(Neubau)	in 1000 t	in 1000 t	in 1000 t	in 1000 t	in 1000 t	in 1000 t
Gesteinsmehl (Füller)	16.310	20.186	24.923	22.828	75.124	159.371
Edelbrechsand	22.562	37.500	51.045	46.754	157.354	315.216
Edelsplitt	136.189	173.946	263.574	241.417	623.795	1.438.921
bit. Bindemittel	6.064	10.466	16.748	15.340	43.311	91.929
hydr. Bindemittel	13.829	0	0	0	7.517	21.346
Sand	158.010	174.759	338.525	277.944	1.707.643	2.656.880
Kies	198.144	212.465	416.532	342.254	1.646.542	2.815.937
Schotter	0	0	44.489	40.749	705.824	791.062
Summe Oberbau	551.108	629.322	1.155.836	987.286	4.967.110	8.290.662

Quelle: Eigene Berechnungen auf Grundlage von Ulbricht (2006)

3.1.3 Jährliche Materialflüsse für den Neu- und Ausbau der Straßeninfrastruktur

Wie einleitend geschrieben, liegen für zwei Drittel des Gesamtnetzes, die Gemeindestraßen, keine Daten über die jährlichen Zuwächse bzw. Rückgänge an Straßenkilometern vor. Die Daten über Zuwächse bei der Länge der überörtlichen Straßen beschränken sich auf die Bundesautobahnen und Kreisstraßen. Durch Neuklassifizierung von Straßen und Neubemessungen sind zudem sinkende Straßenlängen denkbar, obwohl in dieser Straßenkategorie weiterhin Straßen-Kilometer neu errichtet wurden. Der Ausbau von Fahrstreifen kann nur für die Bundesfernstraßen nach Fahrstreifen differenziert ermittelt werden. Eine aktuelle konsistente Straßenstatistik, die sowohl den gesamten Zubau der einzelnen Kategorien (von Bundesautobahnen (BAB) bis Gemeindestraßen), ihre Neuklassifikationen und die Erweiterung der Fahrspuren abbildet, ist nach gegenwärtigem Wissensstand nicht vorhanden.

Neben einer Abschätzung des Ausbaus des Straßennetzes über die Differenz des Straßenbestandes verschiedener Jahrgänge, könnten alternativ die Daten der jährlichen Straßenbauberichte bzw. der Längenstatistik der Straßen des überörtlichen Verkehrs des BMVBS (Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung) (BMVBS 2008a) verwendet werden. Diese weisen jährlich aus, welche Bauabschnitte der Bundesautobahnen (unterteilt nach Fahrstreifen) und Bundesfernstraßen freigegeben wurden bzw. bieten den aktuellen Bestand der vier überörtlichen Straßenkategorien an. Damit ist allerdings noch nicht geklärt, in welchem Umfang sich die Länge der Gemeindestraßen verändert hat.

Unter der Annahme, dass die Dichte an Gemeindestraßen in Deutschland hoch ist und ein Ausbau der Gemeindestraßen nur noch im Zusammenhang mit der Neuerschließung von Wohngebieten stattfindet, lässt sich eine Abschätzung des Zuwachses an Gemeindestraßen über das BASIS-II-Modell an Hand des Zuwachses an Wohngebäuden abschätzen (Buchert et al. 2004). Unter der vereinfachten Annahme, dass alle neu

gebauten Wohngebäude den Bau von Gemeindestraßen nach sich ziehen und nicht im Rahmen von Verdichtungen schon an bestehenden Straßen errichtet werden, könnte man aus dem in BASIS II geschätzten Neubau von 337.000 Wohneinheiten bzw. 190.500 Wohngebäuden im Jahr 2000 über eine Kopplung mit der Straßenlänge pro Haustyp ein Neubau an Gemeindestraßen von 2.140 km ableiten. Einerseits kann diese Zahl tendenziell zu hoch sein, da unterstellt wird, dass alle neu errichteten Wohneinheiten Straßenneubauten nach sich ziehen. Andererseits werden Straßenneubauten für Gewerbegebiete etc. in BASIS II nicht mit berücksichtigt.

Das Deutsche Institut für Urbanistik hat in seiner Studie „Investitionsrückstand und Investitionsbedarf der Kommunen“ (Reidenbach et al. 2008) eine Schätzung des zukünftigen Ausbaus der Gemeindestraßen veröffentlicht. Demnach würde sich für den Zeitraum 2006 bis 2020 ein Neubaubedarf an Erschließungsstraßen von 18.900 km ergeben. Pro Jahr wären dies 1.260 km Neubau von Gemeindestraßen. Wir vermuten, dass der aktuelle Wert des Neubaus von Gemeindestraßen zwischen den Zahlen nach Buchert et al. (2004) und dem zukünftigen Neubaubedarf nach Reidenbach et al. (2008) liegt. Für diese Studie wird ein jährlicher Neubau von 1.500 km Gemeindestraßen angenommen.

Eine weitere, eher theoretische Möglichkeit, den Zuwachs der Straßeninfrastruktur abzuschätzen, besteht in der Analyse der Veränderungen der Flächennutzungsstatistik. Als problematisch erweist sich jedoch, dass die so berechnete Flächennutzung für Verkehrsfläche (17.356 km^2 in 2003, Destatis 2005)⁹ mehr als viermal so hoch ist wie die Berechnung der Straßenflächen mittels Gesamtstraßenlängen multipliziert mit typischer Straßenbreiten je Straßenkategorie (4.186 km^2 in 2003, Ulbricht 2006). Selbst wenn aus der Verkehrsfläche alle anderen Flächen (Schieneninfrastruktur, Plätze, Wege, Flughäfen etc.) heraus gerechnet werden, wäre sie mit 8.540 km^2 immer noch doppelt so hoch wie über eine bottom-up Schätzung (Ulbricht 2006). Methodisch bedingt wird über die Flächennutzungsstatistik die Straßenfläche eindeutig zu hoch geschätzt.¹⁰

Für den Zubau an Straßen des überörtlichen Verkehrs wurden zunächst die Angaben der Längenstatistik der Straßen des überörtlichen Verkehrs mit Stand 1.1.2008 und 1.1.2007 für den aktuellen Bestand verwendet (BMVBS 2008a). Allerdings sind die freigegebenen Abschnitte der Bundesautobahnen von Jahr zu Jahr sehr unterschiedlich. Eine willkürliche Jahresbetrachtung mit den Daten des aktuellsten Stichjahres (Veränderung in 2008 zum Vorjahr) kann daher das langjährige Mittel deutlich unter- oder überschätzen. Zudem sind in den Längenstatistiken keine Angaben über den Ausbau von Fahrstreifen erfasst. Den vorliegenden Berechnungen liegen daher Daten des BMVBS (2009a) über den durchschnittlichen jährlichen Neubau und die Erweite-

⁹ Aktuelle Zahlen der Flächennutzungsstatistik zeigen einen leichten Anstieg der Verkehrsfläche (17.790 km^2 in 2008, Destatis 2010).

¹⁰ Die Siedlungs- und Verkehrsflächen der Flächennutzungsstatistik werden aus den Liegenschaftskatastern ermittelt. Dabei werden die Flurstücke entsprechend der Hauptnutzung klassifiziert. Bei Gemeindestraßen mit Fußwegen werden in der Regel die Flurstücke für Straße und Fußweg zusammengefasst und fließen als Straßenfläche in die Flächennutzungsstatistik ein.

rung der Bundesautobahnen im Zeitraum von 2001-2008 zugrunde. Die Verteilung nach Fahrstreifen ergibt sich aus den Anteilen der einzelnen Kategorien im Jahr 2008. Für den Neubau von Landes- und Kreisstraßen wird ebenfalls ein durchschnittlicher Jahreswert für den Zeitraum 2001 bis 2008 verwendet. Als Zuwachs an Gemeindestraßen wird ein jährlicher Neubau von 1.500 km unterstellt (Tab. 7).

Tab. 7: Durchschnittliche jährliche Veränderung der Straßenlängen 2001 bis 2008 in km

Straßenkategorie	-/+
Bundesautobahnen	126
1-bahnig	10
2-bahnig mit bis zu 4 Fahrstreifen	46
2-bahnig mit mehr als 4 Fahrstreifen	70
Bundesstraßen	-124
mit einer Fahrbahn	-112
mit zwei Fahrbahnen	-11
Landesstraßen	-28
Kreisstraßen	84
Straßen des überörtlichen Verkehrs	58
Gemeindestraßen	1.500
Straßen des überörtlichen Verkehrs und Gemeindestraßen	1.558
Erweiterung der BAB auf 6 Streifen	70

Quelle: Eigene Berechnung auf Grundlage BMVBS (2009a) und Destatis (2005a)

Während Bundesautobahnen jährlich wachsen, geht der Bestand an Bundesstraßen kontinuierlich zurück. Wie hoch der Anteil der Umklassifizierung bzw. Neuvermessung an diesen Rückgängen ist, ist nicht bekannt. Aus der so abgeschätzten Länge des Neubaus und der Erweiterung der Straßeninfrastruktur ergibt sich in der Summe ein jährlicher Anstieg der Straßenfläche um 12,5 km² (Tab. 8).

Tab. 8: Jährlicher Anstieg der Straßenfläche aus Neubau und Erweiterung

Straßenkategorie	Fläche in m ²	Fläche in km ²
Bundesautobahnen	3.159.929	3,16
1-bahnig	76.071	0,08
2-bahnig mit bis zu 4 Fahrstreifen	1.058.000	1,06
2-bahnig mit mehr als 4 Fahrstreifen	2.025.857	2,03
Bundesstraßen		
mit einer Fahrbahn		
mit zwei Fahrbahnen		
Landesstraßen		
Kreisstraßen	546.000	0,55
Straßen des überörtlichen Verkehrs	3.705.929	3,71
Gemeindestraßen	8.250.000	8,25
Straßen des überörtlichen Verkehrs- und Gemeindestraßen	11.955.929	11,96
Erweiterung der BAB auf 6 Streifen	527.143	0,53
Summe Neubau und Erweiterung	12.483.071	12,48

Quelle: Eigene Berechnung auf Grundlage von Ulbricht (2006)

Aufgrund der negativen Entwicklung der Gesamtlänge an Bundesstraßen und Landesstraßen wird folglich nur ein Materialbedarf für den Neubau und die Erweiterung im Bereich der Bundesautobahnen, Kreisstraßen und Gemeindestraßen unterstellt. Dieser wurde wie bei den Bestandsabschätzungen mittels der Regelquerschnitte der RAS-Q (Richtlinie für die Anlage von Straßen - Querschnitt), sowie der Daten der ZTVs (Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen) und RStO (Richtlinie für die Standardisierung des Oberbaues von Verkehrsflächen) pro Straßenkategorie hochgerechnet. Daraus ergibt sich ein Materialbedarf für den Neubau der Straßeninfrastruktur sowie die Erweiterung bestehender BAB-Fahrschreben von insgesamt 21,2 Mio. Tonnen pro Jahr (Tab. 9). Zusätzlich sind für den Neubau Erdbewegungen in einem Umfang von 120 Mio. Tonnen notwendig.

Tab. 9: Jährlicher Materialbedarf für Neubau und Erweiterung der Straßeninfrastruktur

	Bundes- autobahn	Bundes- straße	Landes- straße	Kreis- straße	Gemeinde- straße	Erweite- rung BAB auf 6 Strei- fen	Insgesamt
km	126	0	0	84	1.500	70	
(Neubau)	in 1.000t	in 1.000t	in 1.000t	in 1.000t	in 1.000t	in 1.000 t	in 1.000t
Gesteinsmehl (Füller)	197	0	0	21	192	28	438
Edelbrechsand	272	0	0	43	403	39	757
Edelsplitt	1.641	0	0	222	1.598	235	3.695
bit. Bindemittel	73	0	0	14	111	10	209
hydr. Bindemittel	167	0	0	0	19	24	210
Sand	1.904	0	0	255	4.375	272	6.806
Kies	2.387	0	0	314	4.219	341	7.261
Schotter	0	0	0	37	1.808	0	1.846
Summe	6.640	0	0	906	12.726	949	21.222

Quelle: Eigene Berechnung auf Grundlage von Ulbricht (2006)

Die Gemeindestraßen sind mit einem Materialbedarf von 12,7 Mio. Tonnen dominant, allerdings gehen auch 69 % des Zuwachses an Straßenflächen auf das Konto der Gemeindestraßen.

3.1.4 Jährliche Materialflüsse für die Instandhaltung der Straßeninfrastruktur

Es gibt nur wenige konkrete Daten zum Umfang der jährlichen Instandhaltungen der Straßeninfrastruktur. Die einzige uns bekannte Statistik beschränkt sich auf Bundesautobahnen und schlüsselt die Erneuerungsmaßnahmen nach a) Ersatz der Deckschicht, b) Ersatz der gebundenen Schichten, c) Ersatz des gesamten Oberbaus und d) der Erneuerung im Hocheinbau für das Jahr 2007 auf (BMVBS 2008a). Allerdings können mit diesen Daten keine Aussagen über die Instandhaltung des Gesamtsystems getroffen werden.

Die kontinuierliche Beanspruchung der Straßeninfrastruktur lässt auf einen hohen Erhaltungsaufwand schließen, der durch die DIfU-Studie (Reidenbach et al. 2008) für kommunale Gemeindestraßen bestätigt wird. Der Bund, die Länder und Gemeinden haben zudem ein Interesse daran, ihre Infrastrukturen funktionsfähig zu halten und so ggf. die Nutzungsphase zu verlängern. Es kann daher angenommen werden, dass eine regelmäßige Instandhaltung durch die Straßenbauämter und Straßenbaufirmen erfolgt. Gleichzeitig stehen vorhandene finanzielle Schwierigkeiten - vor allem auf kommunaler Ebene - einer notwendigen Wartung der Straße entgegen. Trotzdem scheint es durchaus realistisch, die einzelnen Straßenschichten über die Lebensdauer abzuschreiben und so einen langjährigen gemittelten Instandhaltungsaufwand zu bestimmen.

Die verwendete Lebensdauer pro Straßenschicht und Straßentyp kann aus Tab. 10 entnommen werden. Sie orientiert sich an den einschlägigen Regelwerken und den dort angegebenen Zeithorizonten. Würden alle Straßen entsprechend dieser Lebensdauer erneuert werden und wäre die Altersstruktur der Straßen in etwa gleich verteilt, würden sich folgende jährliche Materialbedarfe für Wartung und Instandhaltung der Straßeninfrastruktur ergeben:

Tab. 10: Jährlicher Materialbedarf für Wartung und Instandhaltung der Straßeninfrastruktur

	BAB	Bundesstraßen	Landesstraßen	Kreisstraßen	Gemeindestraßen	Summe
	in 1.000 t	in 1.000 t	in 1.000 t	in 1.000 t	in 1.000 t	in 1.000 t
Gesteinsmehl (Füller)	498	593	469	430	1.266	3.255
Edelbrechsand	446	840	760	696	2.216	4.958
Edelsplitt	7.055	4.597	4.144	3.797	9.421	29.014
bit. Bindemittel	879	278	322	295	562	2.336
hydr. Bindemittel	606	31	0	0	177	813
Sand	3.282	3.250	4.182	3.474	13.277	27.465
Kies	3.686	3.905	5.123	4.258	15.799	32.770
Schotter	0	0	0	0	3.198	3.198
Summe Instandsetzung	16.452	13.493	14.999	12.950	45.915	103.809

Quelle: Eigene Berechnung auf Grundlage von Ulbricht (2006)

Tab. 11: Verwendete Lebensdauer nach Straßentyp und Straßenschicht

Lebensdauer in Jahren	Deckschicht	Bindeschicht	3. Tragschicht	2. Tragschicht	1. Tragschicht	Frostschuttschicht
BAB	20	40	55			55
Bundesstraßen	17	40	55			55
Landstraßen	30	60	90	90		90
Kreisstraßen	30	60	90	90		90
Gemeindestraßen	30			60	60	90

Quelle: Ulbricht (2006)

Insgesamt ergibt sich ein jährlicher Materialbedarf für die Instandhaltung der Straßeninfrastruktur von ca. 104 Mio. Tonnen. Selbst wenn die Zahl auf Grund der Finanzengpässe bei Bund, Ländern und Kommunen zu hoch angesetzt sein sollte und Deckschichten länger als 17 – 30 Jahre genutzt werden, zieht die Bestandserhaltung der Straßeninfrastruktur enorme Mengen an benötigten Ressourcen nach sich. Diese sind fünfmal höher als die Ressourcenaufwendungen für den jährlichen Neubau an Straßen.

3.2 Materialbestand und jährliche Materialflüsse für Ingenieurbauwerke der Bundesfernstraßen

3.2.1 Ingenieurbauwerke: Brücken und Tunnel

Neben den Straßen besteht die Straßeninfrastruktur aus zahlreichen Brücken und Tunneln. Die Datenlage zu wichtigen Kriterien wie Anzahl, Altersstruktur oder Bauweise ist allerdings sehr schwierig. Die Anzahl und Länge der Brücken und Straßentunnel im gesamten deutschen Straßennetz kann nur geschätzt werden. Belastbare Daten für Brücken und Tunnel im Ortsverkehr liegen nicht vor. Die BAST (2009) nennt für Deutschland eine Gesamtzahl von 340 Tunnelbauten an überörtlichen Straßen mit einer Gesamtlänge von knapp 300 km, davon 220 Tunnel mit einer Gesamtlänge von 217 km an Bundesfernstraßen. 51 % der Tunnel in Bundesfernstraßen sind demnach mit einer Tunnelröhre gebaut.

Der Gesamtbestand an Brücken (geschätzt ca. 120.000)¹¹ unterscheidet sich stark hinsichtlich Bauweise, verwendeter Materialien und Entstehungszeitraum. Zudem liegen für Brücken im örtlichen Straßennetz keine Angaben hinsichtlich Anzahl, Länge und Konstruktionsweise vor. Eine sinnvolle Abschätzung der Materialbestände aller Straßenbrücken ist dadurch nicht möglich. Die Brücken der Bundesfernstraßen (ca. 38.500) sind deutlich besser einzugrenzen, da sie zum überwiegenden Teil aus Stahl- oder Spannbeton bestehen (BMVBS 2009b). Grundsätzlich lassen sich diese Brücken nach ihrer Bauart unterscheiden: Es kann unterschieden werden zwischen Betonbrücken, Verbundbrücken und Stahlbrücken. Eine feinere Untergliederung ist nach weiteren Merkmalen möglich: So unterscheiden sich Brücken durch die Tragwerksart (u.a. Balken-, Rahmen-, Bogen-, Hänge- und Schrägseilbrücken), die Auflösung des Überbaus (Vollwand, Fachwerk), die Lage des Tragwerkes (Deck-, Trogbriicken) und die Querschnittsform des Überbaus (Platte, Plattenbalken, Hohlkasten) (Lünser 1999). Der Großteil (65 %) der Brücken in den Bundesfernstraßen wurde im Zeitraum zwischen 1965 - 1985 erbaut.

Die folgende Tabelle gibt eine Übersicht über die Brückenformen nach Lünser (1999):

¹¹ Laut BMVBS (2006)

Tab. 12: Brückenformen

Betonbrücken – Hohlkasten
Betonbrücken - Fertigteilträger mit Ortbetonplatte
Betonbrücken – Plattenbalken
Verbundbrücken – Bogen
Verbundbrücke – Hohlkasten
Verbundbrücken – Plattenbalken
Stahlbrücken – Bogen
Stahlbrücke Fachwerk
Stahlbrücken – Hohlkasten
Stahlbrücken – Plattenbalken

Quelle: Lünser (1999)

3.2.2 Materialbestand der Ingenieurbauwerke an Bundesfernstraßen

Als Grundlage für die Abschätzung des Materialbestandes im Bereich Brücken an Bundesfernstraßen wurde eine Aufstellung von Brücken des Bundeslandes Baden-Württemberg herangezogen. Lünser hat in seinem Buch „Ökobilanzen im Brückenbau“ (Lünser 1999) für rund 200 Brücken in Baden-Württemberg eine Auflistung nach Bauart, Länge, Breite und Ausmaß der Fahrbahnoberfläche, sowie Stahl- und Betonmenge erstellt. Wir haben diese mittleren Materialkoeffizienten für jeden Bautyp auf die anteiligen Flächenwerte der 38.500 Brücken der Bundesfernstraßen bezogen (Der Elsner 2009).

Tab. 13: Errechnete mittlere Dimensionierung einer Brücke nach Brückentyp

	Länge in m	Breite in m	Oberfläche in m ²	Baustahl kg/m ²	Spannstahl kg/m ²	Betonstahl kg/m ²	Betonmenge m ³ /m ²
Betonbrücke	217	20	4.287	-	31	71	0,65
Verbundbrücke	141	21	2.985	171	12	48	0,33
Stahlbrücken	305	23	7.021	386	-	-	-

Quelle: Eigene Berechnung auf Grundlage von Lünser (1999)

In Lünser (1999) sind vor allem die Materialbedarfe großer Autobahnbrücken aufgelistet. Die spezifischen Materialbedarfe pro m² Brückenfläche können daher tendenziell überschätzt sein. Insgesamt ist allerdings der reale Materialbestand der deutschen Straßenbrücken höher, da nur ein Drittel der Brücken in die Abschätzung mit einbezogen wurden. Die rund 38.500 Brücken der Bundesfernstraßen haben laut Elsner (2009) eine Fläche von knapp 29 Mio. m² im Jahr 2007. 70 % der Fläche sind Brücken aus Spannbeton, gefolgt von Stahlbetonbrücken (19 %). Der Rest sind reine Stahlbrücken. Aus der Verbindung der durchschnittlichen Koeffizienten pro Brückentyp mit dem

Bestand an Brückenfläche ergibt sich eine gespeicherte Betonmenge von 39,2 Mio. Tonnen, sowie Stahl in einer Größenordnung von 3,7 Mio. Tonnen (davon rund 1 Mio. Tonnen Baustahl und 2,7 Mio. Tonnen Bewehrungs- bzw. Spannstahl).

Straßentunnel

In Deutschland gibt es nach Angaben des BAST. (2009) rund 340 Straßentunnel¹² mit einer Gesamtlänge von 300 km. Im Ecoinvent-Report „Transport Services“ (Spielmann et al. 2007) wird der Materialbedarf pro m Tunnelröhre mit Bezug auf Daten von Maibach et al. (1999) und Leuenberger/Spittel (2001) wie folgt eingeschätzt:

Tab. 14: Materialbestand Straßentunnel

	kg/m
Beton	40.000
Bewehrungsstahl	1350
Stahl niedrig legiert	158

Quelle: Spielmann et al. (2007)

Weiterhin schätzen Spielmann et al. (2007) mit Bezug auf Daten von Frischknecht (1996), dass in der Schweiz 50 % der Tunnel mit zwei Tunnelröhren ausgestattet sind. Für die deutschen Tunnel an Bundesfernstraßen wird ebenfalls ein Anteil an zwei Tunnelröhren an Bundesfernstraßen von 51 % angegeben. Demnach muss man für Deutschland mit einer Tunnellänge an Bundesfernstraßen von insgesamt 450 km rechnen. Dadurch ergibt sich ein abgeschätzter Materialbedarf für Tunnelbauwerke der Bundesfernstraßen von 18 Mio. Tonnen Beton, 608.000 Tonnen Bewehrungsstahl und 71.000 Tonnen niedrig legiertem Stahl.

3.2.3 Jährliche Materialflüsse für den Neu- und Ausbau von Ingenieurbauwerken an Bundesfernstraßen

Für Brücken und Tunnel liegen lediglich Daten für den Neubau im Bereich der Bundesfernstraßen vor. Es wird deshalb auch nur dieser Teil in der Abschätzung des Materialbedarfs berücksichtigt. Der Zuwachs an Brückenfläche stammt aus *Der Elsner* (2009) und gibt den Jahresdurchschnitt zwischen 2000 und 2007 wider. Die Angaben sind unterteilt in vier Brückenkategorien. Der spezifische Materialbedarf pro m² Brückenfläche wurde wie bei den Bestandsschätzungen aus Lünser (1999) abgeleitet und der Materialbedarf pro m Tunnelröhre aus den Ecoinvent-Daten (Spielmann et al. 2007) entnommen. Die Brückenfläche der Bundesfernstraßen stieg zwischen 2000 und 2007 um 480.000 m² pro Jahr an (Tab. 15). Dies entspricht einem jährlichen Wachstum von 1,66 % bezogen auf den Bestand von knapp 29 Mio. m² Brückenfläche

¹² Es wird aus der Broschüre des BMVBS nicht deutlich, auf welchen Straßentyp sich die 340 Tunnel beziehen. Die geringe Anzahl lässt jedoch vermuten, dass hier nur die Straßentunnel der Bundesautobahnen gemeint sein können. Andere Daten zur Gesamtzahl an Tunnel liegen nicht vor.

der Bundesfernstraßen in 2007. Die Aufteilung nach Brückenkategorien wird aus der Tab. 15 ersichtlich.

Für neue Tunnelbauten liegen nur die Materialkoeffizienten aus Spielmann et al. (2007) vor. Es ist unklar, wie viele der neuen Tunnelbauten aus nur einer Tunnelröhre oder aus mehreren Tunnelröhren bestehen. Es wird allerdings vermutet, dass höhere Sicherheitsanforderungen zunehmend den Bau von je einer Tunnelröhre pro Fahrtrichtung zur Folge haben. Die insgesamt schlechte Datenlage veranlasst uns hier allerdings vorsichtig zu schätzen und die Längendaten des Neubaus wie im Bestand mit 50 % der Länge des Tunnelneubaus mit einer Tunnelröhre und 50 % der Länge mit zwei Tunnelröhren hoch zu rechnen.

Tab. 15: Aufteilung der jährlich neu erbauten Brücken und Tunnel an Bundesfernstraßen

	Ingenieurkategorie	Neubau
1. Brücken	Spannbeton (in m ²)	320.000
	Stahlbeton (in m ²)	78.571
	Stahl (in m ²)	11.429
	Stahlverbund (in m ²)	70.000
2. Tunnel (in Meter)		18.579

Quelle: Eigene Berechnung auf Grundlage von *Der Elsner* (2009)

Der überwiegende Anteil der neu gebauten Brücken ist in Spannbetonbauweise erbaut. Reine Stahlbrücken bilden die große Ausnahme. Der jährliche Neubau von Brücken und Tunneln an Autobahnen und Bundesstraßen verursacht geschätzt einen Materialbedarf von knapp 1,15 Mio. t Beton und rund 89.400 t Stahl (Tab. 16).

Tab. 16: Jährlicher Materialbedarf für den Neubau von Brücken und Tunneln der Bundesfernstraßen

In Tonnen	Ingenieurbauwerke	Stahl (in t)	Beton (in t)
1. Brücken	Spannbeton	32.760	308.692
	Stahlbeton	8.044	75.795
	Stahl	4.406	
	Stahlverbund	16.188	17.140
2. Tunnel		28.016	743.143

Quelle: Eigene Berechnung auf Grundlage von *Der Elsner* (2009), Lünser (1999) und Spielmann et al. (2007)

3.2.4 Jährliche Materialflüsse für die Instandhaltung von Ingenieurbauwerken an Bundesfernstraßen

Die Brücken und Tunnel der Bundesfernstraßen wurden überwiegend nach 1965 erbaut. Die bisherige Lebensdauer dieser Brücken ist also 45 Jahre und jünger (Der Elsner 2009). Bei einer angenommenen Lebensdauer von 50 Jahren würde entsprechend ein großer Teil der Brücken der Bundesfernstraßen in den nächsten 10 - 20 Jahren das Ende ihrer Nutzungsphase erreicht haben. Untersuchungen der BAST (Bundesan-

stalt für Straßenwesen) bescheinigen den Brücken der Bundesfernstraßen allerdings noch einen relativ guten Bauzustand. Kritisch wird hingegen der Zustand der kommunalen Brücken eingeschätzt. Laut Reidenbach et al. (2008) ist ein Großteil der kommunalen Ingenieurbauwerke hochgradig sanierungsbedürftig. Vor allem in Ostdeutschland existiert noch ein großer Nachholbedarf an Erneuerung kommunaler Bausubstanz, gerade im Bereich der Brückenbauwerke. Nach einer Untersuchung von 42 kommunalen Brücken im Vogtland sind 43 % der Brücken in so marodem Zustand, dass sie komplett ersetzt werden müssten (Schneider 2008). Auch in den alten Bundesländern ist ein hoher Anteil der kommunalen Brückenbauwerke in einem schlechten Zustand und sanierungsbedürftig. Aufgrund der schlechten Datensituation, die belastbare Abschätzungen zur Fläche von Brücken der Landes-, Kreis- und Gemeindestraßen nicht zulässt, kann in dieser Studie folglich auch keine Hochrechnung des jährlichen Materialbedarfs für den Neubau und die Instandhaltung oder den Ersatz von Brücken jenseits der Bundesfernstraßen vorgenommen werden. Zumal die Konstruktion, die verwendeten Baumaterialien und der Erstellungszeitraum der kommunalen Brücken noch deutlich divergenter als bei Bundesfernstraßen sind und damit die Berechnung des Materialbedarfs deutlich erschweren würden.

Bei einer Abschreibung des Materialbestandes der Brücken- und Tunnelbauwerke von Bundesfernstraßen über die Lebensdauer von 50 Jahren (Brücken) bzw. 100 Jahren (Tunnel) würde dies einen jährlichen Materialbedarf von 858.000 t für Brückenbauwerke und 187.000 t für Tunnel ergeben. Diese Werte sind zu 91 % (Brücken) bzw. 96 % (Tunnel) durch den Bedarf nach Beton bestimmt. Mit 81.000 t Stahl ist der jährliche Bedarf dennoch hoch.¹³

¹³ Auf Grund der Altersstruktur der Brücken an Bundesfernstraßen und der vereinfachten Annahme, dass Brücken und Tunnel am Ende ihrer Nutzungsphase in ähnlicher Materialintensität wieder an Ort und Stelle errichtet werden, ist es in unseren Augen zulässig, den Materialbedarf für Instandhaltung über die Abschreibung der technischen Lebensdauer zu ermitteln.

3.3 Schieneninfrastrukturen

3.3.1 Netzlänge und Aufbau der Schieneninfrastruktur in Deutschland

Die Netzlänge, also die Ausdehnung eines Schienennetzes kann auf drei Arten bestimmt werden:

- **Streckenlänge:** Die Streckenlänge gibt die Länge der befahrenen Strecken, unabhängig von der Anzahl der Gleise, an.
- **Linienlänge:** Bei der Linienlänge werden Strecken, die von mehreren Linien benutzt werden, mehrfach gezählt.
- **Gleislänge:** Die Gleislänge ist die gesamte Länge aller Gleisanlagen; eine zweigleisige Strecke wird also doppelt gezählt.

Für die Berechnung der Ressourcen, die sich im Infrastrukturtyp „Schienen“ befinden, ist die Gleislänge ausschlaggebend.

Laut aktuellen Daten des Statistischen Bundesamtes (Destatis 2010) betrug das Streckennetz der Eisenbahninfrastruktur im Jahr 2009 41.104 km. Davon waren 37.934 km Strecken, die der Eisenbahnbau und -betriebsordnung unterliegen. Die restlichen 3.170 km Streckenlänge sind Straßenbahnen, die in dieser Studie nicht mit abgeschätzt wurden. Die Aufteilung der Strecken-Kilometer in Gleislänge und unterschiedliche Streckenkategorien wurden aus Schmied/Mottschall (2010) übernommen, die auf Daten der Deutschen Bahn zurück greifen konnten, die sonst nicht öffentlich zur Verfügung stehen. Demnach betrug das Schienennetz in Deutschland (ohne Straßenbahnen und die S-Bahn-Netze Berlin und Hamburg) rund 73.000 Gleis-Kilometer. Davon wurden 87 % von der Deutschen Bahn AG betrieben, 11 % von anderen öffentlichen Bahnunternehmen und 2 % waren nichtöffentliche Gleisanlagen, z.B. Gleise auf Firmengeländen.

Tab. 17: Gleislänge des deutschen Schienennetzes im Jahr 2007 (km)

Deutsche Bahn AG	Hochgeschwindigkeitsverkehr	6.000
	Ausbaustrecke	15.220
	Übrige Strecke	30.320
	Service­strecke	11.750
Nicht-DB	Übrige Strecke	4.680
	Service­strecke	3.130
Werkbahnen		1.900

Quelle: Schmied/Mottschall (2010)

Der Unterbau

Der Unterbau umfasst alle Teile, die dazu dienen, den Oberbau zu tragen: von Erdbauwerken wie Rampen, Dämmen und Geländeeinschnitten bis zu Ingenieurbauwerken wie Brücken oder Tunnel.

Erdbauwerke

Geländeeinschnitte, bei denen Erdreich entfernt wird, gehören zu den Erdmassenbewegungen. Auch bei der Aufschüttung von Rampen und Dämmen werden erhebliche Massen an Erdmaterial umgesetzt. Inwieweit diese zum Materialspeicher der Technosphäre gezählt werden, hängt von der Ziehung der Systemgrenzen ab. Nach dem MIPS-Konzept sind jene Erdmassenbewegungen zu zählen, wenn der gesamte Primärmaterialaufwand zur Errichtung und für den Betrieb von Infrastrukturen berücksichtigt werden soll, sie werden jedoch nicht als Zugang zum Materialspeicher der Technosphäre gezählt, da sie systemtechnisch zugleich Input- und Outputströme darstellen (Schmidt-Bleek et al. 1998). In einer MIPS-Studie zur finnischen Schieneninfrastruktur wird danach auch deutlich, dass die Erdbewegungen des Unterbaus der wichtigste Faktor für den abiotischen Materialinput darstellen (Vihermaa et al. 2006). Eine Berechnung der Massen ist schwierig, da ein Damm auf tragfähigem Grund einen minimalen Aufbau von 2,50 m Höhe haben kann – auf weniger tragfähigem Grund, z.B. in einem Moorgebiet, aber durchaus Schütthöhen von bis zu 10 m keine Seltenheit sind. Man müsste also jeden Streckenabschnitt einzeln betrachten und die Höhen des Unterbaus herausfinden, um die Massen abschätzen zu können. Allerdings sind diese Massen zwar von ihrer Quantität bedeutsam, jedoch handelt es sich meist um Erdreich, dessen erneute Entnahme vom gleichen Ort für eine Wiederverwertung von untergeordneter Bedeutung ist. Daher werden diese Mengenflüsse zwar bei der Materialintensität von Bauwerken berücksichtigt, jedoch nicht bei der Abschätzung des Materialspeichers der Technosphäre.

Planum

Als oberste Schicht des Unterbaues dient eine Foundationsschicht aus Kies und Sand, die einerseits Niederschlagswasser von den Gleisanlagen ableiten soll und gleichzeitig auch als Frostschutzschicht dient. Laut Schmied/Mottschall (2010) wird sie in einer Dicke von 40 cm ausgeführt und hat eine Lebensdauer von 60 Jahren.

Der Oberbau

Auf dem Unterbau schließt sich der Oberbau an. Dieser umfasst das Gleisbett, die Schwellen und die darauf montierten Schienen. Das Gleisbett besteht entweder aus Schotter und Schwellen (Schotteroberbau) oder aus einer Festen Fahrbahn (800 km Gleislänge).

Schienen

Es gibt mehrere Arten von Schienen. Im deutschen Eisenbahnnetz sind fast ausschließlich Vignolschienen mit den drei folgenden Profilen verbaut:

- Das Profil S 49 ist mit 49,4 kg/m das Leichteste. Es war bis 1963 das Regelprofil der Deutschen Bundesbahn. Bei einem Durchschnittsalter der Gleise von ca. 30 Jahren sollte man also davon ausgehen, dass es kaum noch Abschnitte mit diesem Profil gibt. Allerdings sind laut Schmied/Mottschall (2010) noch rund 23 % der verlegten Schienenprofile vom Typ S 49.
- Das Profil S 54 wiegt 54,5 kg/m und ist seit 1963 das Regelprofil der Deutschen Bahn. Der Anteil an den verlegten Schienen in Deutschland beträgt 36 %.
- Das Profil UIC 60 mit 60,3 kg/m wird seit 1970 für hochbelastete Strecken (z.B. enge Radien, hohe Belastungen, Hochgeschwindigkeitstrassen) verwendet. Die Schienen haben in der Fertigung Längen von 60 Metern und werden vor Ort miteinander verschweißt. Rund 34 % der Gleiskilometer sind mit Schienen des Profils UIC 60 ausgeführt (Schmied/Mottschall 2010).

Auf Grund der hohen Qualitätsanforderungen an Schienen wird zur Herstellung von Schienen nur Primärstahl verwendet.

Schwellen

Schwellen tragen die Schienen. Sie bestehen aus Holz, Stahl oder Beton. Sie sind i.d.R. 2,60 m lang – unter Weichen mind. 2,80 m – und werden in einem Abstand von 60 cm verlegt. Größere Abstände bis zu max. 130 cm kann es in Ausnahmefällen geben.

Seit den 1990er Jahren werden in Deutschland hauptsächlich Betonschwellen verbaut. Sie wiegen 250 bis 300 kg. Ursprünglich wurde ihre Lebensdauer auf 60 Jahre geschätzt, mittlerweile geht man von 30 bis 40 Jahren aus. In den letzten Jahren hat es allerdings mehrere Fälle gegeben, bei denen der Beton schon nach weniger als zehn Jahren Risse bekommen hat, so dass die Schwellen erneuert werden mussten. Anscheinend stellt die Qualitätssicherung in diesem Bereich noch ein Problem dar.

Hartholzschwellen (153 kg, meist aus Buchenholz) werden auf weniger beanspruchten Gleisen verwendet. Sie werden beim Neubau weniger eingesetzt, was allerdings daran liegt, dass hauptsächlich neue Hochgeschwindigkeitsstrecken gebaut werden und selten Regionalstrecken. Der Vorteil von Holzschwellen liegt in dem einfacheren Transport durch ihr leichtes Gewicht gegenüber Stahl- oder Betonschwellen und den geringeren Herstellungskosten. Der Energieverbrauch für die Herstellung ist um ein Viertel geringer als der für eine Betonschwelle – 4.800 zu 6.300 Kilojoule (KJ) (Corbat 2008). Allerdings ist die Entsorgung schwierig, da die Schwellen – um eine lange Liegedauer von bis zu 40 Jahren zu gewährleisten – mit giftigem Holzschutzmittel – meist Teeröl – imprägniert werden und somit Sondermüll darstellen.

Stahlschwellen werden heutzutage nicht mehr verbaut, mit Ausnahme von Y-Schwellen. Diese wiegen ca. 140 kg. Durch ihre Verzweigung muss nur alle 120 cm eine Schwelle verlegt werden. Ihre Lebensdauer liegt ähnlich der der Betonschwelle bei 30 bis 45 Jahren.

Schienenbefestigungsmittel

Die Schienenbefestigungsmittel halten die Schienen an den Schwellen. Es gibt verschiedene Möglichkeiten: Schienennägel, Schwellenschrauben, Schrägfedernägel, Federklammern u.a.. Ihr Einsatz hängt zudem vom verwendeten Schwellentyp ab.

Der Oberbau K wurde bis Ende der 80er Jahre verwendet:

- Schiene – Pappelholzplättchen – Rippenplatte
- Hakenschraube – Schraubenmutter – Federring – Klemmplatte
- Schwellenschraube

Der modifizierte Oberbau KS wird seit Ende der 80er Jahre verwendet:

- Schiene – Kunststoffzwischenlage – Rippenplatte
- Hakenschraube – Schraubenmutter – Epsilon-Spannklemme
- Schwellenschraube

Für die Befestigung von S-54- und UIC-60-Schienen auf Betonschwellen wird die Bauart W verwendet:

- Schiene – 5 mm dicke Kunststoffzwischenlage – Betonschwellen
- Epsilon-Spannklemmen, in Kunststoffdübel eingedrehte Schwellenschrauben

Schotteroberbau

Bis auf 800 km Feste Fahrbahn werden die Schwellen in einer Schotterschicht gebettet, die wiederum die Schienen tragen. Das Schotterbett hat eine Regelstärke von 30 bis 40 cm. Seit Anfang der 1990er Jahre wird im Bereich der DB nur noch Schotter der Körnung 1 (\varnothing 30 bis 65 mm) verwendet. Das Schotterbett hat laut Schmied/Mottschall (2010) eine Lebensdauer von 15 Jahren und rund 0,1 % der Schottermasse muss pro Jahr bei der Instandhaltung des Schotterbettes (Reinigen und Stopfen) ersetzt werden.

Feste Fahrbahn

Bei der Festen Fahrbahn besteht der Oberbau aus einer Beton- oder Asphaltplatte, auf die entweder direkt die Schienen oder erst Betonschwellen und dann die Schienen montiert werden. Die Feste Fahrbahn wird in Deutschland seit 1991 vor allem auf Hoch- und Höchstgeschwindigkeitsstrecken sowie auf Tunnelabschnitten eingesetzt. Die teure Herstellung verhindert, dass sie flächendeckender gebaut wird. Außerdem gibt es eine höhere Schallemission als beim Schotteroberbau, die nur durch aufwändi-

ge und teure Maßnahmen zu verringern ist. Die Lebensdauer wurde auch hier anfangs auf mindestens 60 Jahre geschätzt; allerdings gibt es immer wieder Problemen mit der Qualität des Betons, so dass die Lebensdauer derzeit als kürzer eingeschätzt werden muss.

Es gibt drei mögliche Aufbauten für eine Feste Fahrbahn:

- Schiene – Spannbetonschwelle – Asphalttragschicht – Hydraulisch gebundene Tragschicht aus Mineralstoffgemisch;
- Schiene – Spannbetonschwelle – Betontragschicht – Hydraulisch gebundene Tragschicht aus Mineralstoffgemisch;
- Schiene – Betontragschicht – Hydraulisch gebundene Tragschicht aus Mineralstoffgemisch.

Als Schiene wird grundsätzlich der Typ UIC-60 verwendet. Die Tragschichten sind zwischen 200 und 300 mm stark. Die obere Tragschicht ragt etwa zehn Zentimeter über die Schwellen hinaus, die untere ca. 60 cm.

Weichen

Auf dem Streckennetz der Deutschen Bahn gibt es ca. 73.000 Weichen (Bahn TV 2008). Es gibt vier gängige Arten von Weichen: einfache Weichen, Doppelweichen, Kreuzungsweichen und Bogenweichen. Jede Weichenart besteht aus den Schienen des jeweiligen Gleises und zusätzlichen Bauteilen (Radlenker, seitliche Stützen etc.). Die Schwellen unter Weichen sind etwas länger als unter normalen Schienen. Die Materialintensität eines Gleises ist also an einer Weiche etwas höher als auf der freien Strecke. Allerdings ist eine Berechnung nicht möglich, da nicht herauszufinden ist, welche Anzahl es von welcher Weichenart gibt. Die Unterschiede dürften für den gesamten Materialbestand der Schieneninfrastruktur aber vernachlässigbar sein.

Ingenieurbauwerke

Im Streckennetz der DB gab es im Jahr 2008 ca. 26.900 Brücken mit einer Gesamtlänge von 611 km sowie 598 Tunnel mit einer Gesamtlänge von 452 km (Schmied/Mottschall 2010). Nicht berücksichtigt sind Brunnen und Tunnel an stillgelegten Streckenabschnitten. Der Großteil der Brücken waren Brücken über Straßen (46 %) und Wasserläufen (29 %). Große Talbrücken, die meist als Spannbetonbrücken ausgeführt sind, sind sowohl von ihrem Anteil am Brückenbestand als auch an der Brückenlänge von geringer Bedeutung. Kleinere Brücken sind oft als Stahlbetonbrücken gefertigt. Schmied/Mottschall (2010) berechnen den Materialbedarf für drei verschiedene Brückentypen (Talbrücken, Stahlbrücken und einfache Betonbrücken). Diese Daten bilden die Grundlage für unsere Abschätzungen.

Die Durchschnittslänge der Tunnel im Netz der Deutschen Bahn AG ist laut Schmied/Mottschall (2010) 760 m. Sie werden danach unterschieden, ob sie in offener oder geschlossener Bauweise erstellt wurden. Offene Bauweise bedeutet, dass die

Tunnelröhre in einer offenen Baugrube gefertigt wurde, die nach Fertigstellung verfüllt wurde und sich so ins Landschaftsbild einfügt. Bei geschlossener Ausführung wird der Tunnel mittels Maschinen oder Sprengungen in den Fels getrieben. Der Beton- und Stahlverbrauch unterscheidet sich erheblich zwischen den beiden Bauformen. Nach Schmied/Mottschall (2010) werden in den letzten Jahren Tunnel vor allem in geschlossener Bauweise erstellt, allerdings schätzen sie den Anteil der Tunnel in offener Bauweise am Bestand mit 20 – 25 % ein.

Weitere Anlagen

Streckenelektrifizierung

Rund die Hälfte des deutschen Bahnnetzes ist elektrifiziert. Zu der Elektrifizierung gehören die Oberleitungen sowie die zur Aufhängung benötigten Masten. Zudem besitzt die Deutsche Bahn eine eigene Energieversorgung mit eigenem Netz und eigenen Kraftwerken, die den Bahnfahrstrom erzeugen.¹⁴

Die Masten bestehen zumeist aus Stahl, selten aus Stahlbeton und sind mindestens sieben Meter hoch. Bei entsprechenden Geländebedingungen können Oberleitungsmasten auch deutlich höher gebaut sein. Die Abstände der Masten richten sich nach der Art der Strecke und den Geländebedingungen. Im Durchschnitt steht auf Hochgeschwindigkeitsstrecken alle 60 Meter und auf den übrigen Strecken alle 70 Meter ein Mast. An mehrgleisigen Strecken werden teilweise Masten aufgestellt, die zwei oder mehr Fahrdrähte halten. Diese Bauweise ist hinsichtlich der Masten weniger aufwändig, allerdings ist die Materialintensität pro km Streckenelektrifizierung ähnlich der der Aufstellung von einem Mast pro Gleis, da zum einen höhere Masten verwendet werden und zum anderen die Ausleger entsprechend länger sein müssen. Insofern ist es zulässig näherungsweise von einem Mast pro 60 bzw. 70 Meter Gleis auszugehen.

An den Masten sind Ausleger aus Stahl oder Aluminium befestigt. Die Materialintensität hängt nicht von festen Werten wie z.B. der Streckenklasse ab; im Neubau wird anscheinend vermehrt Aluminium verwendet. Zwischen dem Mast und dem Ausleger befinden sich Silikon-Isolatoren, die allerdings in dieser Studie nicht mit abgeschätzt wurden.

An den Auslegern ist der Fahrdraht aus Kupfer befestigt. Seine Legierung hängt davon ab, um welchen Streckentyp es sich handelt: Es gibt Kupfer-Silber-Legierungen bei Ausbaustrecken bis zu 230 km/h und Kupfer-Magnesium-Legierungen bei Hochgeschwindigkeitsstrecken bis zu 350 km/h. Der Fahrdraht wird von einem parallel verlaufenden magnesiumlegierten Kupfertragseil gehalten. Dazwischen gibt es im Durchschnitt alle 10 Meter einen Abstandhalter aus Bronze. Bei Strecken ab 160 km/h befindet sich an jedem Mast zusätzlich ein bronzenes Y-Beiseil zur Stabilisierung.

¹⁴ Die Energieversorgung der Bahn ist nicht Bestandteil dieser Studie.

Signaltechnik

Entlang der Bahnstrecken existieren umfangreiche Signal- und Kommunikationsanlagen. Die Signaltechnik wird überwiegend von Stellwerken aus gesteuert und dient dazu, bestimmte Streckenabschnitte für die Durchfahrt zu sperren oder frei zu geben. Auf Ausbau- und Hochgeschwindigkeitsstrecken wird weiterhin noch eine so genannte Linienzugbeeinflussung zur Steuerung des Schienenverkehrs verwendet. Signalanlagen haben eine Nutzungsdauer von ca. 20 Jahren (DB Netz AG 2007). Köser et al. (2002) geben laut Schmied/Mottschall (2010) eine Lebensdauer von 25 Jahren (Haupt- und Vorsignale) bzw. 15 Jahren (Weichen-Signale) an.

Eine Abschätzung der Anzahl und damit verbundenen Materialmengen von Signalen ist schwierig, da es sehr viele unterschiedliche Bauarten von Signalen gibt. Schmied/Mottschall (2010) geben mit Verweis auf Studien der UIC (2010) und Köser et al. (2002) an, dass auf einen Kilometer zweigleisiger Strecke durchschnittlich 3,3 (UIC) bzw. 2,1 Signalanlagen (Köser et al.) installiert sind. Die Signaltechnik ist über Kabel mit den Stellwerken verbunden, zusätzlich verfügt die Deutsche Bahn AG noch über eigene Telekommunikationsleitungen entlang der Gleise. Im Bestand sollte die Mehrzahl der Kabel mit einem Kupferleiter und einer Ummantelung auf PVC- bzw. PE-Kunststoff verlegt sein. In den letzten Jahren werden aber auch vermehrt Glasfaserkabel verlegt. Während Köser et al. (2002) von 3,6 km Kabel pro zweigleisigem Strecken-Kilometer ausgehen, rechnen Schmied/Mottschall (2010) mit 8,5 km pro zweigleisigem Strecken-Kilometer.

Die Kabel werden häufig in Kabelkanälen entlang der Bahnstrecken geführt. Die Kanäle sind aus Beton gefertigt.

Stellwerke

Neben Signalen werden in Stellwerken auch noch Weichen zentral geregelt. Es gibt mechanische, elektromechanische und elektronische Stellwerke. Im Bereich der Deutschen Bahn werden hauptsächlich elektronische Stellwerke neu gebaut, die große Bereiche des Streckennetzes überwachen. Nach Angaben der DB AG sind im Netz der DB ca. 700 elektronische Stellwerke in Betrieb (DB AG 2007). Hinzu kommen rund 3.800 mechanische und elektromechanische Stellwerke (Schmied/Mottschall 2010).

Da es sich bei Stellwerken um Gebäude handelt, die in ihrem Aufbau und ihrer Größe sehr unterschiedlich ausfallen können, ist eine Berechnung der Ressourcen zu diesem Punkt nicht ohne weiteres möglich. Wir haben deshalb die Daten aus Schmied/Mottschall (2010) übernommen.

Bahnhöfe und andere Gebäude

Die Deutsche Bahn unterhält ca. 5.400 Bahnhöfe, davon rund 200 reine S-Bahnhöfe. Die Bahnhöfe werden von der DB AG in 6 Kategorien nach ihrer Bedeutung für den Schienenverkehr klassifiziert. Schmied/Mottschall (2010) konnten mit internen Daten der DB AG den verschiedenen Bahnhofs-Kategorien typische Gebäude- und Bahn-

steigflächen zuordnen und so den Bestand an Beton und Stahl für diese Gebäude abschätzen. Der Beton- und Stahlverbrauch für die Erstellung der Bahnwerke und Güterbahnhöfe wurde in Schmied/Mottschall (2010) ebenfalls über die Flächen- und Stockwerksabschätzung ermittelt. Diese Daten wurden für unsere Studie übernommen.

3.3.2 Materialbestand der Schieneninfrastrukturen

Ein Großteil der Daten wurde aus der aktuellen UBA-Studie übernommen, die von Schmied/Mottschall im Jahr 2010 mit detaillierten Daten der DB AG erstellt wurde. Zusätzlich wurden aus Fielder (2005), Fendrich (2007), sowie verschiedenen Herstellerangaben spezifische Gewichtsangaben sowohl für den Oberbau als auch für die Oberleitung samt Masten recherchiert. Die Daten beziehen sich wie bei Schmied/Mottschall (2010) auf die Schieneninfrastruktur ohne S-Bahn, U-Bahnen oder Straßenbahnen.

Diese Daten sind als Durchschnittswerte zu verstehen. In Bahnhöfen ist nicht für jedes Gleis ein Mast vorhanden, dafür sind die Masten häufig deutlich höher und massiver gebaut, da sie mehrere Oberleitungen tragen müssen. Neben Schmied/Mottschall (2010) wurden zudem noch Daten von Spielmann et al. (2007) und von Rozycki et al. (2003) als Quellen für die Ermittlung spezifischer Materialkoeffizienten verwendet. Die Aktualität und Detailtiefe der Daten aus Schmied/Mottschall (2010) veranlasste uns auf diese Daten zurückzugreifen und die weiteren Literaturquellen lediglich als Kontrollvariable zu verwenden.

Zur Abschätzung muss zunächst das Streckennetz sowohl nach Streckentyp, ein- oder zweigleisig, und schließlich ob elektrifiziert oder nicht differenziert werden. Für die 73.000 km Gleislänge wird folgende Einteilung aus den vorhandenen Daten abgeleitet:

Tab. 18: Aufteilung der Gleis-Kilometer nach Bauart

	gesamt	Feste Fahr- bahn	HGV	ABS	übrige Strecke DB	Service- strecke DB	übrige Netz nicht- DB	Service- strecke nicht- DB	Werk- bahnen
Gleislänge	73.000	800	5.200	15.220	30.320	11.750	4.680	3.130	1.900
Elektrifiziert	33.400	800	5.200	15.220	9.100	0	1.404	0	0
2-gleisig (55 % laut Destatis 2005)		800	5.200	15.220	19.000				
1-gleisig (45 % laut Destatis 2005)		0	0	0	11.320	11.750	4.680	3.130	1.900

Quelle: Eigene Zusammenstellung nach Schmied/Mottschall (2010)

Wie man der Tabelle entnehmen kann, gehen wir davon aus, dass die Hochgeschwindigkeits- und Ausbaustrecken zu 100 % sowohl zweigleisig als auch elektrifiziert ausgebaut sind. Da laut Destatis (2008b) 45 % der Strecken 1-gleisig verlaufen, werden die Nicht-DB-Strecken sowie die Servicestrecken der DB komplett als 1-gleisige Strecken gewertet.

Unterbau

Für das Planum werden die Daten aus Schmied/Mottschall (2010) übernommen, die für eingleisige Strecken einen Kies- und Sandbedarf von 9,6 t/km bei Neubaustrecken und 7,4 t/km bei den übrigen Strecken angeben. Zweigleisige Strecken brauchen wegen der größeren Breite der Planumschicht demnach 14,9 t/km (Neubaustrecke) bzw. 12,3 t/km (übrige Strecke). Für Erdarbeiten zur Erstellung des Schienendammes werden in Schmied/Mottschall (2010) basierend auf zwei nicht öffentlich zugänglichen Studien (UIC 2010, Köser et al. 2002) pro Meter zweigleisiger Strecke im Neubau 180 m³ Aushub und 135 m³ Verfüllung angenommen. Für die übrigen zweigleisigen Strecken wird hingegen nur ein Aushub von 75 m³ pro Meter bzw. eine Verfüllmenge von 25 m³/m unterstellt.

Oberbau

Weiterhin wird angenommen, dass Stahlschwellen nur noch in sehr geringen Stückzahlen verbaut sind. Der Großteil der verwendeten Schwellen im Netz der DB sind Betonschwellen. Wir übernehmen die Angaben aus Schmied/Mottschall (2010), die von 75 % Betonschwellen, 16 % Holz- und 7 % Stahlschwellen im deutschen Netz ausgehen. Die restlichen 2 % der Schwellen konnten nicht zugeordnet werden. Da in Hochgeschwindigkeits- und Ausbaustrecke ausschließlich Betonschwellen verwendet werden, ordnen wir die Holz- und Stahlschwellen vollständig den Nebenstrecken und Servicestrecken der Deutschen Bahn zu.

In den folgenden Tabellen sind die spezifischen Materialkoeffizienten aufgeführt, die für die Materialabschätzungen verwendet werden. Die Werte wurden aus Schmied/Mattschall (2010) übernommen, die auf interne Daten der Deutschen Bahn AG zurückgreifen konnten.

Tab. 19: Spezifische Materialkoeffizienten Bahnschwellen

	Betonschwellen		Holzschwellen		Stahlschwellen
	Beton	Bewehrungsstahl	Buchenholz	Teeröl	Stahl
in t/km					
1-gleisig	455,1	11,7	255,1	23,3	238,4
2-gleisig	910,2	23,3	510,1	46,7	476,8

Quelle: Schmied/Mottschall (2010)

Schmied/Mottschall (2010) geben mit Verweis auf Werner (2008) an, dass 14 kg Teeröl zur Imprägnierung der Holzschwellen verwendet werden. Daraus ergibt sich ein Bedarf an Teeröl von 23,3 Tonnen pro km Gleisstrecke. Die Daten für Betonschwellen stimmen mit unseren Abschätzungen sowie den Angaben in anderen Veröffentlichungen (z.B. Spielmann et al. 2007) überein.

Tab. 20: Spezifische Materialkoeffizienten Befestigung Schienen

in t/km	Befestigung Schienen					
	Betonschwellen		Holzschwellen		Stahlschwellen	
	Eisenteile	Kunststoff (PE)	Eisenteile	Kunststoff (PE)	Eisenteile	Kunststoff (PE)
1-gleisig	7,7	2	43,2	0,4	9,1	0,4
2-gleisig	15,4	4	86,4	0,8	18,2	0,8

Quelle: Schmied/Mottschall (2010)

Die Angaben von Schmied/Mottschall (2010) stimmen für Beton- und Stahlschwellen mit unseren Angaben überein. Die detaillierteren Daten in Schmied/Mottschall mit deutlich höheren Werten für die Befestigung der Schienen auf Holzschwellen veranlassen uns, diese Daten zu verwenden.

Tab. 21: Spezifischer Materialkoeffizient Bahnschotter

in t/km	Schotter		
	Betonschwellen	Holzschwellen	Stahlschwellen
1-gleisig	3.573	3.030	2.319
2-gleisig	7.099	6.141	4.907

Quelle: Schmied/Mottschall (2010)

Tab. 22: Spezifischer Materialkoeffizient Feste Fahrbahn

in t/km	Feste Fahrbahn	
	Beton	Bewehrungsstahl
1-gleisig	2.717	66
2-gleisig	5.434	133

Quelle: Schmied/Mottschall (2010)

Die Betonwerte für Feste Fahrbahnen werden bei Schmied/Mottschall aus verschiedenen Beispieldatensätzen zweier Neubaustrecken (Köln-Rhein/Main, Nürnberg-Ingolstadt) abgeleitet und von uns zur Berechnung des Materialbestandes verwendet.

Tab. 23: Spezifischer Materialkoeffizient Bahnschienen

		S49	S54	UIC60	Sonstige (wie UIC60)
Stahl pro Schiene	kg/m	49,43	54,54	60,34	60,34
Stahl – eingleisig	t/km	98,86	109,08	120,68	120,68
Stahl – zweigleisig	t/km	197,72	218,16	241,36	241,36
Anteile am Schienennetz in %		23	34	36	7

Quelle: Schmied/Mottschall (2010)

Oberleitung

Für die Abschätzung der gespeicherten Materialmengen in der Schieneninfrastruktur wird angenommen, dass die Oberleitungsmasten an Hochgeschwindigkeits- und Ausbaustrecken komplett aus Betonmasten gefertigt sind. Für übrige Strecken wird dagegen von 80 % Stahl- und 20 % Betonmasten ausgegangen. Eine weitere getroffene Annahme ist, dass an eingleisigen Strecken nur auf einer Gleisseite Masten verwendet werden, an zweigleisigen Strecken dagegen auf beiden Gleisseiten. Eine Unterscheidung zwischen ein- und zweigleisig muss daher nicht vorgenommen werden. Allerdings müssen die Tunnel-Kilometer mit geringeren Werten berechnet werden, da im Tunnel die Oberleitung an der Tunneldecke angebracht werden kann.

Tab. 24: Spezifischer Materialkoeffizient Oberleitungsmasten

Oberleitungsmasten	in t/km
HGV/ABS ohne Tunnel - 2 gleisig	
Beton	91,68
Bewehrungsstahl	44,4
Stahl	6,6
Aluminium	4,3
HGV/ABS mit Tunnel - 2 gleisig	
Beton	0,24
Bewehrungsstahl	0
Stahl	6,6
Aluminium	4,3
übrige Strecken ohne Tunnel: Betonmasten - 2	
Beton	74,64
Bewehrungsstahl	36,1
Stahl	5,3
Aluminium	3,5
übrigen Strecken ohne Tunnel: Stahlmasten - 2	
Beton	18
Bewehrungsstahl	33,6
Stahl	17,8
Aluminium	3,5
übrigen Strecken mit Tunnel - 2 gleisig	
Beton	0,24
Bewehrungsstahl	0
Stahl	5,3
Aluminium	3,5

Quelle: Schmied/Mottschall (2010)

Die Werte für Oberleitungsmasten leiten Schmied/Mottschall (2010) von zwei Studien Köser et al. (2002) und UIC (2010) ab. Die Werte für Stahl und Aluminium beziehen sich auf die Ausleger der Oberleitungsmasten, an denen der Oberleitungsdraht befestigt ist.

Tab. 25: Spezifischer Materialkoeffizient Oberleitungsdraht

Oberleitungsdraht	
Hochgeschwindigkeit – zweigleisig	in t/km
Kupfer	2,1
Bronze	2,5
Ausbaustrecke – zweigleisig	in t/km
Kupfer	2
Bronze	1,3
übrige Strecken – zweigleisig	in t/km
Kupfer	1,8
Bronze	1,1

Quelle: Schmied/Mottschall (2010)

Ein weiterer Bestandteil der Elektrifizierung von Bahnstrecken sind so genannte Unterwerke. Diese dienen als Transformatoren entlang der elektrifizierten Strecken.

Mit Rückgriff auf verschiedene Literaturquellen gehen Schmied/Mottschall in ihrer Studie von einem Unterwerk alle 170 km Gleislänge aus. Dies sind geringere Angaben als in den bei Schmied/Mottschall zitierten Studien Köser et al. (2002) und UIC (2010), die sich jedoch auf Hochgeschwindigkeitsstrecken beziehen.

Tab. 26: Materialbedarf Unterwerke

	in t/km
Stahl	1,18
Kupfer	0,72
Mauerwerk	2,95
Beton	0,26

Quelle: Schmied/Mottschall (2010)

Signaltechnik

Ursprünglich waren die Unterwerke, Signaltechnik und Gebäude mangels vorhandener Daten nicht für die Abschätzung des Materialbedarfs der Schieneninfrastruktur vorgesehen. Da zum Ende der MaRes-Projektlaufzeit die parallel erarbeiteten Daten der Schmied/Mottschall-Studie zur Verfügung standen, wurden die entsprechenden Angaben in die Gesamtabeschätzung des Materialbestandes der Schieneninfrastruktur integriert.

Für die Gesamtmenge des Materialbestandes der Schieneninfrastruktur ist die Signaltechnik allerdings relativ unbedeutend.

Tab. 27: Spezifische Materialkoeffizienten Signaltechnik

in t/km		1-gleisig	2-gleisig
Signaltechnik	Beton	1,008	1,68
	Stahl	0,8	1,34
Kabel Signaltechnik	Kupfer	3,46	5,77
	PE	2,35	3,92
Kabelkanal Signaltechnik	Beton	50	83,3
Linienzugbeeinflussung	Kupfer	1,39	2,79
	PE	0,94	1,89
Stellwerk	Beton/Ziegelwerk		7,16
	Stahl		0,56
	Kupfer		0,03
	HDPE		0,04

Quelle: Schmied/Mottschall (2010)

Gebäude der Schieneninfrastruktur

Schmied/Mottschall (2010) geben in ihrer Studie die geschätzten Beton- und Stahlmengen für die Personen- und Güterbahnhöfe sowie die Instandhaltungswerke der Deutschen Bahn an. Die Personenbahnhöfe werden dabei mit der durchschnittlichen Materialmenge pro entsprechende Bahnhofskategorie verknüpft. Die Güterbahnhöfe und Instandhaltungswerke werden mit durchschnittlichen Quadratmeterzahlen und Stockwerken und den daraus abgeleiteten Beton- und Stahlmengen hochgerechnet.

Tab. 28: Spezifischer Materialbedarf Personenbahnhöfe

Bahnhofskategorien	Anzahl	Fläche in m ² (inkl. Bahnsteige)	Beton in t pro Bahnhof	Stahl in t pro Bahnhof
1	20	49.121	60.180	1.177
2	63	20.509	25.015	477
3	216	9.694	12.859	238
4 bis 6	4.883	2.672	4.336	70

Quelle: Schmied/Mottschall (2010)

Tab. 29: Spezifischer Materialbedarf Güterbahnhöfe und Instandhaltungswerke

Aufwand pro Werk	Beton in t	Stahl in t
Instandhaltungswerke der DB AG	55.370	1.172
Güterbahnhöfe	6.842	150

Quelle: Schmied/Mottschall (2010)

Ingenieurbauwerke der Deutschen Bahn AG (Brücken und Tunnel)

Schmied/Mottschall unterscheiden zwischen Talbrücken, die deutlich materialintensiver sind, Betonbrücken über Straßen und Stahlbrücken. Bei Tunneln wird zwischen Tunneln in geschlossener und offener Bauweise unterschieden.

Tab. 30: Spezifischer Materialbedarf Eisenbahnbrücken

Brücken	Beton in t/m	Bewehrungsstahl in t/m	Konstruktionsstahl in t/m
Talbrücke	76,8	2,975	0,525
Betonbrücken	33,6	1,275	0,225
Stahlbrücken			7,2

Quelle: Schmied/Mottschall (2010)

Tab. 31: Spezifischer Materialbedarf von Eisenbahntunneln

Tunnel	Beton in t/m	Stahl in t/m	Ausbruch m ³ /m
geschlossene Bauweise	89,28	1,6	127,9
offene Bauweise	117,6	6,1	299,8

Quelle: Schmied/Mottschall (2010)

Aus der Verteilung der Gleis-Kilometer (Tab. 18), der Tunnel- und Brücken-Kilometer kombiniert mit den einzelnen spezifischen Materialkoeffizienten (Tab. 19 bis Tab. 31) sowie der Materialabschätzung für 5.182 Personenbahnhöfe, 741 Güterbahnhöfe und 107 Instandhaltungswerke der Deutschen Bahn ergibt sich ein Gesamtmaterialbestand der deutschen Schieneninfrastruktur von rund 1,1 Mrd. Tonnen. Davon sind 98 % mineralische Rohstoffe, vor allem Sand-Kies des Planums (670 Mio. Tonnen), Beton für Schwellen, Tunnelbauten und Gebäude von zusammen 138 Mio. Tonnen, sowie Granit für den Gleisschotter (314 Mio. Tonnen).

Tab. 32: Materialbestand Schieneninfrastruktur

		in 1.000 t
Mineralische Rohstoffe	Sand-Kies	670.515
	Beton	137.565
	Granit	313.935
	Mauerwerk	99
Metalle	Bewehrungsstahl	4.667
	Primärstahl	13.354
	Eisen/Stahl	2.827
	Aluminium	134
	Kupfer	436
	Bronze	46
Kunststoff	PE	396
	HDPE	3
Sonstige	Teeröl	273
	Buchenholz	2.979
Summe		1.147.229

Quelle: Eigene Berechnung auf Grundlage von Schmied/Mottschall (2010) und eigenen Abschätzungen

3.3.3 Jährlicher Materialbedarf für Neu- und Ausbau der Schieneninfrastruktur

Das Gesamtstreckennetz des Schienenverkehrs ist in den letzten Jahren geschrumpft, auch wenn die Streckenlänge in 2009 wenige Kilometer länger ist als 2008. Eine Ableitung des Neubaus über die Veränderung der Gesamtlänge ist also nicht möglich, da trotz schrumpfender Gesamtstreckenlängen noch neue Bahnstrecken gebaut bzw. ausgebaut werden. Destatis (2008b) veröffentlicht mit den „Betriebsdaten des Schienenverkehrs“ Angaben zur Entwicklung des Schienennetzes in der Aufteilung nach

Neubau, Netzabbau und Reaktivierung. Die Werte für die Jahre 2006 bis 2008 sind in Tab. 33 dargestellt. Ähnlich wie bei den Bundesautobahnen ist die Gesamtzahl der fertig gestellten Gleisabschnitte der einzelnen Jahre sehr unterschiedlich. Es macht daher wenig Sinn, mit den konkreten Daten eines Jahres zu rechnen. Zudem werden diese Fertigstellungen auch durch externe Ereignisse beeinflusst. Der hohe Anteil an Netzneubau im Jahr 2006 ist auch bedingt durch die Fußball-WM 2006, zu der bestimmte Strecken fertig gestellt sein sollten.

Tab. 33: Entwicklung des Schienennetzes (km)

	2005	2006	2007	2008
Streckenlänge	38.206	38.165	38.005	37.798
Gleislänge	70.557			
Netzabbau		243,9	385,7	231,5
Neubau		137,3	56,1	24,3
Reaktivierung		65,7	169,2	169,2

Quelle: Destatis (2008b)

Aus dem gemittelten Wert der Jahre 2006 - 2008 würde sich ein Neubau von 73 km Streckenlänge pro Jahr, oder 146 km Gleislänge ergeben. Eine Analyse der Bauzeiten einiger Neubaustrecken (Köln - Rhein/Main, Hannover - Würzburg, Nürnberg - Erfurt sowie Nürnberg - Ingolstadt) ergibt eine Fertigstellung pro Jahr zwischen 5 km (Nürnberg - Erfurt, 107 km Neubaustrecke von 1996 bis geplant 2017)¹⁵ bzw. 20 km (Köln - Rhein/Main, 143 km von 1995 - 2002). Aus diesen Fertigstellungszeiträumen scheinen 73 km Neubaustreckenlänge pro Jahr als zu hoch geschätzt. Wir schätzen in dieser Studie den jährlichen durchschnittlichen Materialbedarf für Neubaustrecken von 50 km Streckenlänge oder 100 km Gleislänge. Es liegen keine Informationen darüber vor, ob die Neubaustrecken mit Fester Fahrbahn oder herkömmlich mit Betonschwellen in Schotterbauweise errichtet wurden. Weiterhin ist nicht bekannt, ob die Strecken ein- oder zweigleisig gebaut wurden. Allerdings zeigen die online verfügbaren Informationen der z.Z. im Bau befindlichen Strecken bzw. der kürzlich fertig gestellten Strecken, dass diese mittlerweile fast vollständig in der Bauweise Feste Fahrbahn erstellt werden. Die Abschätzung des Materialbestandes basiert damit auf der Annahme, dass alle Neubau-Strecken als zweigleisige Feste Fahrbahnen gebaut werden.

Damit ist aber nur ein Teil der Baumaßnahmen im Bereich der Schieneninfrastruktur erfasst. Neben dem Bau von kompletten Neubaustrecken werden bestehende Strecken von Grund auf saniert und so für höhere Geschwindigkeiten ausgebaut. Die so überholten Strecken-Kilometer sollten den Anteil der reinen Neubaustrecken übersteigen. Es liegen jedoch keine konkreten Daten für das Gesamtnetz vor. Um dennoch ein Verhältnis für die Neubaustrecke vs. Ausbaustrecke festzulegen, wurde eines der

¹⁵ Die lange Bauzeit ergibt sich zum einen aus einem mehrjährigen Baustopp, veranlasst im Jahr 2002, sowie dem Umstand, dass 53 km der 107 km langen Neubaustrecke in Form von Tunneln und Brücken erstellt werden müssen.

wichtigsten Bauprojekte der Deutschen Bahn, die Strecke München - Berlin, näher analysiert. Im Jahr 2006 wurden 3 von 5 Bauabschnitte dieser Strecke eröffnet mit einer Gesamtlänge von 358 km. Der Abschnitt Nürnberg - Ingolstadt über 89 km war eine Neubaustrecke, die Abschnitte Berlin - Halle/Leipzig (187 km) und Ingolstadt - München (82 km) waren Ausbaustrecken. Verallgemeinert man diese Zahlen kommt man auf ein Verhältnis von 1:3 zwischen Neubau- und Ausbaustrecke. Wird zudem unterstellt, dass Ausbaustrecken ebenfalls durchgängig als zweigleisige Strecke modernisiert werden, ergeben sich bei 100 km neugebauter Gleislängen modernisierte Gleislängen als Ausbaustrecke von 300 km.

Auch bei der Abschätzung des Materialbedarfs für Ausbaustrecken stellt sich die Frage, in welcher Bauweise diese modernisiert wurden. Beispiele wie die Strecke Berlin – Hamburg zeigen, dass dies noch überwiegend in üblicher Schotterbauweise mit Betonschwellen erfolgt. Weiterhin stellt sich die Frage, ob die Oberleitung nur teilweise oder komplett inklusive Mast erneuert wird. Darüber liegen keine Informationen vor. Daher wird für die Abschätzung des jährlichen Materialbedarfs für die Modernisierung bestehender Fernverkehrsstrecken zu Ausbaustrecken eine komplette Erneuerung der Oberleitungsinfrastruktur und die Verwendung von Betonmasten angenommen. Da auf bestehende Streckenanlagen zurückgegriffen wird, wäre es unzulässig, auch den Unterbau mit in die Berechnung für den Ausbau einfließen zu lassen, auch wenn es durch Gleisverlegungen durchaus zu Neubauten des Unterbaus bei Ausbaustrecken kommen kann. Für die Abschätzung werden daher nur 10 % der spezifischen Materialkoeffizienten pro km für den Unterbau verwendet.

Die Abschätzung des jährlichen Materialbedarfs bezieht sich somit auf zum Teil geschätzte Daten und eine Reihe Annahmen. Aus der jährlich neugebauten Streckenlänge von 100 km und dem Ausbau von 300 km ergeben sich pro Jahr folgende Materialbedarfe:

Tab. 34: Jährlicher Materialbedarf für Neu- und Ausbau der Schieneninfrastruktur

		in 1.000 t
Mineralische Rohstoffe	Sand-Kies	1.936
	Beton	1.461
	Granit	2.840
	Mauerwerk	1
Metalle	Bewehrungsstahl	54
	Primärstahl	98
	Eisen/Stahl	10
	Aluminium	2
	Kupfer	5
	Bronze	1
Kunststoff	PE	4
	HDPE	0
Sonstige	Teeröl	0
	Buchenholz	0
Summe		6.411

Quelle: Eigene Berechnungen, auf Basis der Koeffizienten aus Schmied/Mottschall (2010)

Neben knapp 6,23 Mio. Tonnen mineralischer Rohstoffe (Kies, Schotter, Beton) fällt der jährliche Bedarf von knapp 152.000 Tonnen Stahl für Schienen und Bewehrung ebenfalls hoch aus.

3.3.4 Jährlicher Materialbedarf für die Erneuerung und Instandhaltung der Schieneninfrastruktur

Neben dem Neu- und Ausbau bedarf es auch einer regelmäßigen Instandhaltung des Streckennetzes. Zur Abschätzung des jährlichen Materialbedarfs für Instandhaltung könnte die Abschreibung über die technische Lebensdauer erfolgen. Allerdings zeigen die Probleme mit den Betonschwellen auf der Strecke Hamburg-Berlin, dass die erwartete Lebensdauer für bestimmte Bestandteile der Schieneninfrastruktur zu optimistisch eingeschätzt wird. Andere Streckenelemente werden u. U. auch über ihre technische Lebensdauer hinweg weiter genutzt. Schmied/Mottschall (2010) geben für alle einzelnen Bestandteile der Schieneninfrastruktur Daten zur technischen Lebensdauer an. Schreibt man die Materialbestände über die entsprechenden technischen Lebensdauern ab, kommt man auf einen jährlichen Instandhaltungsbedarf in Höhe von 41,3 Mio. Tonnen.

Tab. 35: Jährlicher Materialaufwand für Instandhaltung über technische Lebensdauer abgeleitet

		in 1.000t
Mineralische Rohstoffe	Sand-Kies	12.395
	Beton	2.517
	Granit	25.614
	Mauerwerk	0
Metalle	Bewehrungsstahl	85
	Primärstahl	437
	Eisen/Stahl	88
	Aluminium	2
	Kupfer	20
	Bronze	5
Kunststoff	PE	15
	HDPE	0
Sonstige	Teeröl	9
	Buchenholz	99
Summe		41.286

Quelle: Eigene Berechnung auf Grundlage der Daten in Schmied/Mottschall (2010)

Schmied/Mottschall selbst benutzen jedoch die technische Lebensdauer nur, um den Errichtungsaufwand auf ein Jahr umrechnen zu können. Für den eigentlichen Instandhaltungsaufwand nutzen Schmied/Mottschall spezielle jährliche Ersatzbedarfe, die häufig aus Köser et al. (2002) übernommen wurden. Für den Unterbau, die Ingenieurbauwerke sowie die Gebäude liegen keine speziellen Ersatzbedarfe vor, so dass sie in der Studie von Schmied/Mottschall nicht mit beachtet werden können. Schätzt man den jährlichen Materialbedarf für Instandsetzung über die dort genannten jährlichen Ersatzbedarfe (z.B. eine Schwelle pro zwei km eingleisiger Strecke), so kommt man lediglich auf einen jährlichen Materialaufwand für die Instandhaltung von 471.000 t. Die Ergebnisse der beiden Methoden unterscheiden sich somit um fast das 88-fache.

Tab. 36: Jährlicher Materialaufwand für Instandhaltung abgeschätzt über jährlichen Ersatzbedarf

		in 1.000 t
Mineralische Rohstoffe	Sand-Kies	0
	Beton	63
	Granit	384
	Mauerwerk	0
Metalle	Bewehrungsstahl	5
	Primärstahl	10
	Eisen/Stahl	2
	Aluminium	1
	Kupfer	2
	Bronze	0
Kunststoff	PE	1
	HDPE	0
Sonstige	Teeröl	0
	Buchenholz	1
Summe		471

Quelle: Eigene Berechnung, nach Schmied/Mottschall (2010)

Insbesondere bei den Daten zum eingesetzten Schotter wird deutlich, dass die Angaben zur Berechnung der Materialflüsse für Instandhaltung einer enormen Spannweite unterliegen. Insofern besteht eine Unsicherheit über die tatsächliche Höhe der jährlichen Materialflüsse. Im Bereich der Schieneninfrastruktur reicht der jährliche Bedarf an Primärschotter für die Gleisbettung von 384.000 Tonnen laut jährlichem Ersatzbedarf (Schmied/Mottschall (2010) über 1,28 Mio. Tonnen (20 % der 6,42 Mio. Tonnen, die laut DB AG jedes Jahr ausgetauscht werden) bis 5,1 Mio. Tonnen (20 % der 25,6 Mio. Tonnen, die sich aus der Abschreibung der technischen Lebensdauer ergeben (Tab. 35). Wir haben aus Gründen der Vergleichbarkeit mit den Daten der anderen Infrastruktursysteme den jährlichen Erneuerungsbedarf der Schieneninfrastruktur über die Abschreibung der technischen Lebensdauer ermittelt. Der Materialbedarf für Gebäude wurde analog zu den Energieerzeugungsinfrastrukturen nur mit 10 % in die jährliche Abschreibung einbezogen. Die damit berechnete Größenordnung erscheint plausibel, wie im Folgenden kurz dargelegt wird:

Die Deutsche Bahn AG hat in ihrer Internetpräsenz für das Jahr 2007 Investitionen von 3,5 Mrd. Euro für die Instandsetzung ihres Streckennetzes angegeben. Danach wurden in 2007 1.800 Weichen, 4.400 km Schienen, 3,3 Mio. Schwellen und 3,9 Mio. m³ Schotter ausgewechselt. Vermutlich sind in diesen Daten auch die Baumaßnahmen an Ausbaustrecken enthalten. Trotzdem würden die Werte der DB AG umgerechnet auf Gleislängen bedeuten, dass im Jahr 2007 auf 2.200 km Gleislänge die Schienen erneuert wurden.

Bei einem Abstand von 60 cm zwischen zwei Schwellen bedeutet der Austausch von 3,3 Mio. Schwellen eine Gesamtlänge von 1.980 km Gleisstrecken. Bei einem Schwellen-Gewicht von 280 kg (Betonschwelle) bzw. 153 kg (Holzschwelle), würde allein der Austausch von 3,3 Mio. Schwellen einen Materialaufwand von 924.000 Tonnen Beton

bzw. 505.000 Tonnen Buchenholz bedeuten. Für den unterstellten Ausbau von jährlich 300 km bestehenden Strecken zu Ausbaustrecken würden für Betonschwellen 273.000 Tonnen Beton anfallen. Die verbleibenden 650.000 Tonnen sind dabei näher an dem geschätzten Instandhaltungsbedarf über die technische Lebensdauer (rund 1 Mio. Tonnen pro Jahr) als die 25.000 Tonnen geschätzt über den angenommenen jährlichen spezifischen Ersatzbedarf von einer Schwelle je zwei Kilometer eingleisiger Bahnstrecke. Auch bei einem Plausibilitätscheck der Schotterwerte scheint der Wert abgeleitet über den jährlichen Ersatzbedarf von 0,1 % der Schottermenge im Bestand zu niedrig. Dies wären rund 384.000 Tonnen pro Jahr. Bei einer Schotterdichte von $1,65 \text{ t/m}^3$ würde der Austausch von 3,9 Mio. m^3 (laut DB AG) dagegen einen jährlichen Austausch von 6,42 Mio. Tonnen Schotter bedeuten. In den Bestandschätzungen wurde von einem Schotter-Volumen von $2.170 \text{ m}^3/\text{km}$ für Betonschwellen ausgegangen.¹⁶ Setzt man diese Zahl ins Verhältnis zu den 3,9 Mio. m^3 ausgewechselten Schotters, dann ergibt sich daraus eine Gleislänge von 1.798 km. Zusammen mit den ausgewechselten Schienen und Schwellen sind die angegebenen Größenordnungen in Tab. 35 in sich stimmig. Bei einer Gleislänge der deutschen Schieneninfrastruktur von rund 73.000 km würden demnach pro Jahr bei ca. 2,5 % bis 3 % der Gleislängen das Schotterbett gereinigt und neu gestopft sowie die Schwellen und Schienen instand gesetzt.

¹⁶ Die Betonschwellen sind in 75 % der Gleis-Kilometer verwendet (Schmied/Mottschall 2010).

3.4 Wasserstraßen

Wasserstraßen sind neben Straße und Schiene Teil des Verkehrswegenetzes. Deutschland verfügt im europäischen Vergleich über das umfangreichste und am intensivsten ausgebaute Binnenwasserstraßennetz mit den höchsten Verkehrsleistungen. Die überwiegende Zahl der deutschen Großstädte besitzt einen direkten Wasserstraßenanschluss mit eigenem Binnenhafen.

Bundeswasserstraßen werden nach dem Wasserwegerecht unterschieden in Binnen- und Seewasserstraßen (Wasserwegerecht)¹⁷. Letztere umfassen die Flächen zwischen der Küstenlinie oder der seewärtigen Begrenzung der Binnenwasserstraßen und der seewärtigen Begrenzung des Küstenmeeres (WSV 2008b). Sie sind nicht Teil dieser Studie. Binnenwasserstraßen fungieren überwiegend als Verkehrsweg für den Gütertransport, wenngleich ihre Bedeutung für die Sport- und Freizeitschifffahrt zunimmt.

Zu den Anlagen an den Binnenwasserstraßen gehören (Stand Juni 2007, nach WSV 2008a):

- 326 Schiffsschleusenanlagen mit 416 Schleusenkammern,
- 337 Wehranlagen,
- 11 Sperrwerke,
- drei Schiffshebewerke,
- zwei Talsperren,
- etwa 1.600 Brücken,
- 10 Kanalbrücken,
- 4.359 Buhnen (Bauwerke zur Flussregulierung, meist geschüttete Dämme, mit Steinen gepflastert oder mit Schotter bedeckt),
- 106 Wasserkraftanlagen.¹⁸

Daneben gibt es mehr als 100 öffentliche See- und Binnenhäfen (BMVBS 2008b).

Jährlich werden 6,7 % (bis zu 240 Mio. Tonnen) der gesamten in Deutschland transportierten Gütermenge mit der Binnenschifffahrt über ein weitmaschiges Netz von 7.354 km Länge¹⁹ (Stand 2005, WSV 2008b) transportiert, 35 % davon unter deutscher Flagge. In erster Linie werden Massengüter transportiert: Steine und Erden, Mineralöle, Erze, feste mineralische Brennstoffe. Seit Anfang der 1990er Jahre verändert

¹⁷ Weitere Differenzierungen erfolgen in Binnen- und Seeschifffahrtsstraßen nach der überwiegenden Art von Schiffsverkehr. Diese ist für diese Arbeit nicht sinnvoll.

¹⁸ Talsperren und Brücken (mit Ausnahme von Kanalbrücken) sind dem Bereich Wasser bzw. Straße und Schiene zugeordnet. Desgleichen sind Wasserkraftwerke Bestandteil des Moduls Energieversorgung.

¹⁹ Davon 6.732 km nach Bundeswasserstraßengesetz und sonstige Binnenwasserstraßen des Bundes (574 km) (WSV 2008b)

sich die Güterstruktur dahingehend, dass zunehmend Container, und damit hochwertige Verbrauchsgüter, über die Wasserstraßen transportiert werden (BMU 2006, 96f). Einen Überblick über das Bundeswasserstraßennetz liefert Abb. 3.

Abb. 3: Übersicht über die Binnenwasserstraßen des Bundes (klassifiziert)

BUNDESWASSERSTRASSEN

- Wasser- und Schifffahrtsverwaltung des Bundes



Quelle: BMVBS (2008f)

3.4.1 Materialbestand der Wasserstraßen-Infrastrukturen

Stofflich relevant sind die Schleusen, verschiedene Formen von Uferbefestigungen und Abdichtungen von Kanälen sowie die Binnen- und Seehäfen. Der Aushub (jährliche Unterhaltungsbaggerungen) wird in dieser Studie nicht erfasst. Desgleichen werden Dämme für den Hochwasserschutz nicht bilanziert. Circa 76 % der Binnenwasserstraßen entfallen auf Flüsse, 24 % der Strecke auf Kanäle (WSV 2009).

Vorliegende Berechnungen basieren zum Großteil auf Untersuchungen von Manstein und Stiller (Stiller 1995; Manstein / Stiller 2000), welche am Wuppertal Institut durchgeführt wurden und im Rahmen von MaRes aktualisiert wurden.

Tab. 37: Länge deutscher Binnenwasserstraßen 2005

	Länge in km	Anteil
Flussstrecken	5.607	0,76
Kanäle	1.747	0,24
Gesamt Binnenwasserstraßen	7.354	1,00

Quelle: WSV (2009)

Kanalabdichtungen

Wird ein Kanal über dem Grundwasserhorizont geführt, muss eine Abdichtung vorgenommen werden. Bei neueren Kanälen geschieht dies durch eine wasserundurchlässige Asphalttschicht, bei älteren Kanälen wurde eine 50 cm dicke Tonschicht eingebaut (Stiller 1995). Verläuft der Kanal unter dem Grundwasserspiegel, werden teilweise zur Vermeidung von Aufschwemmen Folien eingebaut. Der Anteil der ungedichteten Kanalstrecken wurde von Stiller über den Anteil losen Deckwerks an Kanalufern geschätzt. Unterschieden wird des Weiteren nach dem Querschnitt: Neuere Kanäle sind bevorzugt in Trapezquerschnitt erstellt worden, während bei älteren Kanälen die Rechteckform vorherrscht (Regelbreite 43,10 m).

Wendet man die spezifischen Materialverbräuche von Stiller (1995) pro Meter Kanalabdichtung auf die gesamtdeutsche Kanallänge von 1.747 km an, so erhält man folgenden Materialbestand:

Tab. 38: Materialbestand Kanalabdichtungen

		Asphalt- abdichtung	Ton- abdichtung	ohne Ab- dichtung	Gesamt (in 1.000 t / bzw. 1.000 m²)
Anteil Kanalnetz		0,38	0,43	0,19	
Anteil (m)		663.860	751.210	331.930	
Asphaltbeton	t	24,3			16.132
Bitumensand	t	2			1.328
Ton	t		48		36.058
Filtermatten	m ²			30,9	10.257
PVC-Folie	t			5,7	1.892

Quelle: Berechnet auf Grundlage von Stiller (1995); PVC-Folie 1,32 kg/m², Einbaudichte Ton 2 t/m³

Ton und Asphaltbeton machen hier mit 36 bzw. 16 Millionen Tonnen den größten Massenanteil aus.

Uferbefestigungen

Uferbefestigungen schützen Binnenwasserstraßen fast durchgehend gegen Erosion durch Wellenschlag an Ufern. Die Verteilung der verschiedenen Arten von Uferbefestigungen (durchlässiges/loses Deckwerk, dichtes Deckwerk, Deckwerk über Asphalt, Spundwände, Betonmauern) variiert in Kanälen und Flüssen und basiert auf Angaben von 1981 für westdeutsche Binnenwasserstraßen, welche von Stiller 1995 aktualisiert wurden.

Um die in Uferböschungen gebundenen Materialien zu bilanzieren, wurden die von Stiller angegebenen Materialverbräuche pro Meter Uferböschung auf das Gesamtnetz hochgerechnet. Daraus ergibt sich folgender aktueller Materialbestand:

Tab. 39: Materialbestand Uferbefestigungen an Wasserstraßen

		Kanäle	Flüsse	Gesamt
Anteil m		1.747.000	5.607.000	
Sand & Kies	1.000 t	432	5.859	6.291
Schotter & Splitt	1.000 t	730	5.971	6.702
Schüttsteine, Wasserbausteine	1.000 t	4.051	17.942	21.994
Schlacke, Grandgeröll	1.000 t	2.247	493	2.740
Mastixverguss	1.000 t	332	869	1.201
Geotextilien	1.000 m ²		11.186	11.186
Asphaltbeton	1.000 t		310	310
Bitumensand	1.000 t		224	224
Beton	1.000 t		1.290	1.290
Stahlspundwand	1.000 t	1.291	2.220	3.512

Quelle: Berechnet auf Grundlage von Stiller (1995); Rohdichte Beton 2,3 t/m³; Spundwandgewicht 0,33 t/m²

In den Uferbefestigungen dominieren Wasserbausteine. Als Material werden Natursteine oder industriell hergestellte Baustoffe, z.B. Metallhüttenschlacken, verwendet.

Schleusen

Mit Stand Juni 2007 (WSV 2008) gab es an deutschen Binnenwasserstraßen 326 Schiffsschleusenanlagen mit 416 Schleusenkammern sowie 337 Wehranlagen und 11 Sperrwerke. Stiller (1995) hat auf der Grundlage von Massenangaben einzelner Schleusenbauwerke durch lineare Interpolation über die Schleusenlänge und –höhe einen Wert für die deutsche Durchschnittsschleuse berechnet. Der angegebene mittlere Beton- und Stahlverbrauch pro Schleuse wurde auf die aktuelle Gesamtschleusenanzahl hochgerechnet. Damit ergibt sich ein geschätzter Materialbestand in Schleusen wie folgt:

Tab. 40: Materialbestand Schleusen

		mittl. Verbrauch pro Schleuse	Gesamt
Beton	1.000 t	155	50.566
Stahl	1.000 t	4,5	1.460

Quelle: Berechnet auf Grundlage von Stiller (1995); Rohdichte Beton $2,3 \text{ t/m}^3$ Spundwandgewicht $0,33 \text{ t/m}^2$

Umschlaganlagen

Der Güterumschlag auf Schiffe erfordert große Anlagen, die mit enormem Materialaufwand verbunden sind. Es gibt in Deutschland mehr als 100 öffentliche See- und Binnenhäfen (BMVBS 2008b). Aufgrund der Inhomogenität der Hafenanlagen ist eine Bilanzierung praktisch mit großen Schwierigkeiten verbunden. Stiller hat in seiner Materialintensitätsanalyse von 1995 die 32 größeren Binnenhäfen Deutschlands sowie die 7 größten Seehäfen²⁰ Deutschlands bilanziert. An Anlagen sind die Kailänge, sonstige Uferbefestigungen, Eisenbahngleise, Lagerhallen, Silos, Tanks und Kräne relevant. Straßenlängen und Flächen sind nicht erfasst. Auf der Basis der spezifischen Materialverbräuche von Stiller kann die hier errechnete Gesamtmenge (Tab. 41, Tab. 42) lediglich als Anhaltspunkt für die Größenordnungen dienen, da davon ausgegangen werden kann, dass in den letzten 15 Jahren eine erhebliche Ausweitung der Umschlaganlagen stattgefunden hat.

²⁰ Hamburg, Bremen, Lübeck, Kiel, Bremerhaven (Übersee + Fisch), Emden

Tab. 41: Materialbestand Binnenhäfen

	Spund- wandkai	sonst. Ufer	Gleise	offene Lager	gedeckte Lager	Tank	Gesamt
Anlagen Einheit	m	m	m	m2	m2	m3	in 1.000 t
Anlagen Menge (in 1000)	145	63	377	7.883	3.603	6.846	
Beton	13,8	2,3		0,2	1,2		8.099
Kies, Schotter, Stein	6,8	6,8	1,9	0,5	0,5		7.978
Asphaltbeton				0,1			907
Wasserbausteine		4,0					253
Betonstahl	0,3	0,1	0,1		0,1	0,0	661
Stahlspundwand	1,7	1,3					328
Gesamt							18.226

Quelle: Berechnet auf der Grundlage von Stiller (1995), Rohdichte Beton 2,3 t/m³; Spundwandgewicht 0,21 t/m²; Schüttdichte Kies 1,7 t/m³; Schüttdichte Wasserbausteine 2,0 t/m³

Tab. 42: Materialbestand Seehäfen

	Spund- wandkai	sonst. Ufer	Gleise	offene Lager	gedeck- te Lager	Tank	Silos	Gesamt
Anlagen Einheit	m	m	m	m2	m2	m3	t	in 1.000 t
Anlagen Menge (in 1000)	119	206	1.155	7.119	3.410	6.768	1.320	
Beton	16,1	2,3		0,2	1,2		0,2	8.248
Kies, Schotter, Stein	3,4	2,7	1,9	0,5	0,5		0,2	8.718
Asphaltbeton				0,1				819
Wasserbausteine		3,2						659
Betonstahl	0,4	0,1	0,1		0,1	0,0		740
Stahlspundwand	5,4	2,1						1.074
Gesamt								20.259

Quelle: Berechnet auf der Grundlage von Stiller (1995), Rohdichte Beton 2,3 t/m³; Spundwandgewicht 0,35 t/m²; Schüttdichte Kies 1,7 t/m³; Schüttdichte Wasserbausteine 2,0 t/m³

Gesamtmaterialbestand Wasserstraßen

Tab. 43 gibt einen Überblick über die Größenordnungen der in den Wasserstraßen in Deutschland gebundenen Materialien.

Tab. 43: Materialbestand Wasserstraßen in Deutschland

in 1.000 t bzw. 1.000 m ²	Kanal- abdichtung	Ufer- befestigung	Schleusen	Umschlag- anlagen	Gesamt
Sand, Kies		6.291			6.291
Schotter, Splitt		6.702		16.696	23.397
Wasserbausteine		21.994		913	22.906
Schlacke, Grandgeröll		2.740			2.740
Mastixverguss		1.201			1.201
Asphaltbeton	16.132	310		1.725	18.167
Bitumensand	1.328	224			1.552
Ton	36.058				36.058
Beton		1.290	50.566	16.347	68.203
Stahl		3.512	1.460	2.803	7.775
Geotextilien (m²)	10.257	11.186			21.443
PVC-Folie	1.892				1.892

Quelle: Eigene Berechnungen auf Grundlage von Stiller (1995)

Insgesamt sind in den Infrastrukturen der Wasserstraßen knapp 200 Millionen Tonnen Material gebunden, davon zum Großteil Beton und mineralische Baustoffe.

3.4.2 Jährlicher Materialbedarf der Wasserstraßen-Infrastrukturen

Jährliche Materialflüsse durch Neubau / Rückbau

Die Güterschifffahrt, und hier besonders die Containerschifffahrt, hat in den letzten Jahren stark an Bedeutung gewonnen. Hinzu kommt die Öffnung der osteuropäischen Märkte, wodurch die Ost-West-Schifffahrtswege wichtiger geworden sind. Der scharfe Wettbewerb der verschiedenen Verkehrsträger bedingt eine rasche Vergrößerung und Verbesserung der Transportfahrzeuge. Die Programme der Bestandssicherung werden den zukünftigen Anforderungen nicht mehr gerecht. Das Regelschiff der Zukunft wird 135m lang und mind. 11m breit sein und damit einen Ausbau der meisten Schifffahrtswege und entsprechenden Ingenieurbauwerke erfordern (Pogalens / Lenz 2008). So soll nach einem Beschluss der Bundesregierung von 2006 beispielsweise eine Kammverlängerung an allen 27 Schleusen des Neckars für 135m-Schiffe in den nächsten Jahren (bis 2025) erfolgen (ebd.). Je Kammer-Verlängerung wird eine Investitionssumme von 6,9 Millionen Euro kalkuliert (Stuttgarter Zeitung 2008).

Tab. 44: Geplanter Neubau und Erweiterung von Schleusen

		Bauzeit	Beton (m3)	Stahl (t)	Quelle
Neubau	Uelzen II	1998-2005	250.000	33.000	Fockenberg et al. 2005
Ersatzneubau	Sülfeld Süd		90.000	n.a.	Saathoff et al. 2009
Ersatzneubau	Dörverden	2009-2012	n.a.	n.a.	Neubauamt Hannover
Neubau	Minden	2010-2013	n.a.	n.a.	Neubauamt Hannover
Ersatzneubau	Bolzum	2007-2011	n.a.	n.a.	Neubauamt Hannover
Erweiterung	27 Neckar-Schleusen	2011-2025			Pogalens/Lenz 2008, Stuttgarter Zeitung 2008
Erweiterung	10 Mosel-Schleusen*	-2032	70.000**	5.000**	WSV 2007
Neubau	Rothensee	1997-2001	533.000	5.000	Tölle o.J.
Neubau	Hohenwarthe		320.000	41.600	Tölle o.J., Weisner 2003
Neubau	Kaiserschleuse	2006-2010	65.000	42.000	Els 2009

Quelle: Eigene Zusammenstellung, ohne Anspruch auf Vollständigkeit; *jeweils Erweiterung um eine zweite Schleusenkammer; **Beispiel Trier

Darüber hinaus werden durch den gestiegenen Schifffahrtsverkehr kontinuierlich die deutschen Umschlaganlagen ausgebaut und erweitert.

Die vorliegenden Berechnungen stellen Schätzungen der jährlichen Flüsse durch Neubau und Erweiterung dar, auf Grundlage der aktuellen Bundeswasserstraßenprojekte (BMVBS 2008) und Massenbeispielen von Einzelprojekten (Els 2009, Weisner 2003, Tölle o.J., diverse Schifffahrtsämter, Saathoff et al. 2009, Fockenberg et al. 2005).

Folgende Annahmen werden getroffen:

- In Umschlaganlagen erfolgt eine jährliche Erweiterung von offenen Lagerflächen um 5 %, des Spundwandkais um 2 %, sowie der sonstigen Ufer, Gleise und gedeckten Lager um 1 %. Die spezifischen Materialangaben basieren auf Stiller 1995.
- Aktuell werden etwa zwei Schleusen jährlich an die veränderten Schiffsgrößen angepasst. Der Materialaufwand der Erweiterung wird auf etwa 70.000 m³ Beton und 5.000 Tonnen Stahl geschätzt. Darüber hinaus erfolgt ein (Ersatz-)Neubau von einer Schleuse jährlich. Hier ist der Materialaufwand im Vergleich zu den bestehenden Schleusen erhöht: Die Berechnungen basieren auf erhöhten Durchschnittswerten von 150.000 m³ Beton und 20.000 Tonnen Stahl pro Schleuse.

Damit ergibt sich ein jährlicher Input in die Wasserstraßen bedingt durch Neubau und Erweiterung wie folgt:

Tab. 45: Jährliche Materialflüsse Wasserstraßen durch Neubau und Erweiterung

in 1.000 t	Ingenieur- bauwerke	Umschlag- anlagen	Gesamt
Beton	655	424	1.079
Kies, Schotter, Stein		485	485
Wasserbausteine		9	9
Schlacke, Grandgeröll			0
Mastixverguss			0
Stahl	29	34	63
Gesamt	684	951	1.635

Quelle: Eigene Berechnungen

Jährliche Materialflüsse durch Sanierung

Die Abschätzung der Lebensdauer der einzelnen Infrastrukturen der Umschlaganlagen ist schwierig, da gerade in Häfen häufig Erweiterungen und Umbauten stattfinden. Für Wasserstraßen legen Manstein und Stiller (2000) (auf Grundlage von Investitionsrechnungen des DIW für den Ersatzinvestitionsbedarf für die Verkehrswege in Deutschland) folgende Nutzungsdauern zugrunde:

Tab. 46: Nutzungsdauern der Anlageinfrastruktur Wasserstraßen

Trassierungen	116 Jahre
Loses / dichtes Deckwerk	44 Jahre
Spundwände	55 Jahre
Betonmauern	58 Jahre
Schleusenkammern	78 Jahre
Schleusentore	40 Jahre

Quelle: Manstein/Stiller (2000, 13f)

Der Instandsetzungsaufwand an den Schleusenkammern wird analog zu Stiller 1995 geschätzt: der Materialaufwand addiert sich über die Lebensdauer von 78 Jahren auf 5 % des Erstellungsaufwandes. Der Sanierungsaufwand der anderen Infrastrukturen (Umschlaganlagen, Uferbefestigungen, Kanalabdichtungen) wird mangels Daten nicht berücksichtigt. Damit ergibt sich ein jährlicher Materialfluss durch Sanierung an den Schleusen in Deutschland von rund 32.000 Tonnen Beton.

3.5 Kumulierter Materialaufwand

Für die Herstellung der Materialien, die in den verschiedenen Infrastruktursystemen gespeichert sind bzw. jährlich für den Aus- und Neubau bzw. für die Instandhaltung benötigt werden, sind wiederum andere Materialien und Rohstoffe notwendig, die in den direkten Mengen der Bestände und der jährlichen Flüsse nicht wiedergegeben werden. Zudem fallen bei der Gewinnung von Rohstoffen weitere Materialflüsse an, die wirtschaftlich nicht weiter genutzt werden. Dies sind z.B. Abraum im Bergbau oder Erdaushub im Baubereich. Eine Kombination der Bestands- und Flussmengen mit Materialintensitätskoeffizienten (MIT) erlaubt es, diese vorgelagerten Rohstoffaufwendungen, wie auch die wirtschaftlich nicht genutzten Materialien (z.B. Abraum) mit abzubilden und somit ein umfassendes Bild der Materialmengen der Bestände und der jährlichen Flüsse zu zeichnen. Für diese Studie werden die Daten des jeweiligen Bestandes und der jährlichen Materialmengen mit den Materialkoeffizienten der Datenbank des Wuppertal Instituts (Wuppertal Institut 2003) verbunden. Der MIT-Koeffizient der Produkte aus primären Rohstoffen ist in der Regel höher als das gleiche Produkt aus Sekundärrohstoffen. Gerade für die Abschätzung des kumulierten Materialaufwandes für metallische Rohstoffe ist es wichtig zu wissen, ob Primär- oder Sekundärmaterial verwendet wird oder in der Vergangenheit wurde. Allerdings liegen zum einen nur für wenige Basismetalle unterschiedliche MIT-Koeffizienten für die Herstellungsrouten sowohl aus Primär- als auch aus Sekundärmaterial vor. Und zum anderen ist für viele Materialbestände und -flüsse unklar, ob Primär- oder Sekundärmaterial verwendet wurde. Für diese Studie wurde daher bei fehlenden konkreten Information typischen Durchschnittswerte für das Verhältnis Primär- vs. Sekundärmaterialien verwendet: Für Aluminium und Kupfer wird der durchschnittliche MIT-Koeffizient, der jeweils 50 % Primär- und 50 % Sekundäranteil beinhaltet, verwendet. Für Stahl werden verschiedene Koeffizienten verwendet. Der MIT-Koeffizient für Stahl aus der Hochofenroute ist deutlich höher als der Wert für Stahl aus der Elektrostaalroute, bei dem hohe Sekundäranteile üblich sind. Nichtlegierter bzw. niedrig-legierter Stahl ist in unseren Daten in der Regel Bewehrungsstahl, der zumeist aus Elektrostaal besteht. Legierungsstahl oder rostfreier Stahl wird zumeist als Edelstahl mit 17 % Chromanteil und 12 % Nickelanteil gewertet. Wenn keine konkreten Werte für Eisen und Stahl vorhanden sind (z.B. Kleinteile der Schienenbefestigungen etc.), wird nach unseren Abschätzungen Warmbandstahl der Hochofenroute verwendet. Dieser Stahl verfügt über die qualitativen Eigenschaften des Hochofenstahls, ist aber weitestgehend unbearbeitet. Für hochwertigen Stahl, der in Erdgasrohren und Schienen verwendet wird, werden die MIT-Koeffizienten für Maschinenbaustahl und Träger aus der Hochofenroute (Schienen) bzw. Grobbleche der Hochofenroute (Rohre) benutzt. Weiterhin müssen einige MIT-Werte als Proxy des eigentlichen Koeffizienten verwendet werden, da die eigentlichen Koeffizienten nicht vorhanden sind, der Proxy-Koeffizient stofflich jedoch vergleichbar ist. So wird z.B. für bitumische Produkte, für die kein MIT-Koeffizient vorhanden ist, der MIT-Wert von schwerem Heizöl verwendet. Proxywerte sind nachfolgend jeweils unter den Tabellen gesondert gekennzeichnet.

3.5.1 Straßeninfrastruktur

Für Straßen sind nur mineralische Rohstoffe in die Abschätzung mit eingeflossen. Eine Unterscheidung zwischen Primär- und Sekundärmaterial beeinflusst das Ergebnis voraussichtlich nur geringfügig. Unter Beachtung der vorgelagerten Aufwendungen für abiotische Rohstoffe beträgt der kumulierte Materialaufwand des Bestandes 9,4 Mrd. Tonnen, im Gegensatz zum Materialbestand ohne Beachtung der vorgelagerten Prozesse von 7,2 Mrd. Tonnen. Die jährlichen Materialaufwendungen für Neu- und Ausbau bzw. Instandsetzung sind unter Beachtung der vorgelagerten Ressourcenaufwendungen um 31 % (Neu- und Ausbau) bzw. 34 % (Instandhaltung) höher als der direkte Materialeinsatz.

Tab. 47: Kumulierter Materialaufwand der Straßeninfrastruktur

in 1.000 t	MIT-Koeffizienten in t/t	Bestand	kumulierter MA des Bestandes	jähr. Materialflüsse für Neu- und Ausbau	kumulierter MA Neu- und Ausbau	jähr. Materialflüsse für Instandhaltung	kumulierter MA Instandhaltung
Gesteinsmehl (Füller)	1,65	143.272	236.400	438	723	3.255	5.370
Edelbrechsand	1,42	281.497	399.726	757	1.075	4.958	7.040
Edelsplitt	1,42	1.305.251	1.853.456	3.695	5.247	29.014	41.200
bit. Bindemittel*	1,5	82.648	123.972	209	313	2.336	3.504
hydr. Bindemittel	3,2	19.736	63.154	210	671	813	2.603
Sand	1,18	2.290.957	2.703.329	6.806	8.031	27.465	32.408
Kies	1,18	2.463.106	2.906.465	7.261	8.568	32.770	38.669
Schotter	1,42	639.814	908.537	1.846	2.621	3.198	4.542
Summe		7.226.281	9.195.038	21.222	27.249	103.809	135.336

Quelle: Eigene Berechnung auf Basis von Wuppertal Institut (2003), *MIT-Koeffizient für schweres Heizöl

3.5.2 Ingenieurbauwerke der Bundesfernstraßen

Für Brücken und Tunnel der Bundesfernstraßen werden nur Beton und Stahl als Materialkategorien abgeschätzt. Es ist unklar, in welchem Umfang Stahl aus der Primär- und Sekundärroute verwendet wird. Für Spannbeton- und Stahlbetonbrücken wird Bewehrungsstahl verwendet, der auf Grund der geringeren Qualitätsanforderungen aus Elektrostahlwerken stammt und damit einen hohen Anteil an Schrott enthält. Konstruktionsstahl in Stahlbrücken ist dagegen durch höhere Qualitätskriterien gekennzeichnet, die nur im begrenzten Maße den Einsatz von Stahl aus Schrott zulassen. Der hohe Anteil der Spannbetonbrücken am Gesamtbestand an Brücken der deutschen Bundesfernstraßen führt dazu, dass der größte Teil des Stahlbedarfs mit dem MIT-Koeffizienten der Elektrostahlroute berechnet werden kann. Für die Berechnung wird angenommen, dass alle Spann- und Betonstähle im Brückenbau sowie alle unlegierten Stahlmengen im Tunnelbau mittels der Elektrostahlroute produziert wurden, wäh-

rend alle Baustähle im Brückenbau und der niedrig legierte Stahl im Tunnelbau aus der Hochofenroute stammt und mit dem MIT-Koeffizient von Warmbandstahl multipliziert wird.

Unter diesen Annahmen ergibt sich für die Ingenieurbauwerke der Bundesfernstraßen folgender kumulierter Materialaufwand:

Tab. 48: Kumulierter Materialaufwand der Brücken der Bundesfernstraßen

in 1.000 t	MIT-Koeffizienten in t/t	Bestand Brücken	kumulierter MA des Bestandes	jährl. Materialflüsse für Neu- und Ausbau	kumulierter MA Neu- und Ausbau	jährl. Materialflüsse für Instandhaltung	kumulierter MA Instandhaltung
Beton	1,33	39.191	52.124	402	534	784	1.042
Stahl Hochofenroute	7,63	994	7.584	16	125	20	152
Stahl Elektrostenroute	1,47	2.707	3.979	45	66	54	80
Summe		42.892	63.688	463	725	858	1.274

Quelle: Eigene Berechnungen auf Basis von Wuppertal Institut (2003)

Tab. 49: Kumulierter Materialaufwand der Tunnel der Bundesfernstraßen

in 1.000 t	MIT-Koeffizienten in t/t	Bestand Tunnel	kumulierter MA des Bestandes	jährl. Materialflüsse für Neu- und Ausbau	kumulierter MA Neu- und Ausbau	jährl. Materialflüsse für Instandhaltung	kumulierter MA Instandhaltung
Beton	1,33	18.000	23.940	743	988	180	239
Stahl Hochofenroute	7,63	71	542	3	22	1	5
Stahl Elektrostenroute	1,47	608	894	25	37	6	9
Summe		18.679	25.375	771	1.048	187	254

Quelle: Eigene Berechnungen auf Basis von Wuppertal Institut (2003)

Auf Grund des hohen Anteils an Bewehrungsstahl, der normalerweise nicht in der Hochofenroute hergestellt wird, erhöht sich der kumulierte Materialbedarf der Ingenieurbauwerke trotz des hohen Stahlanteils nur um 50 % gegenüber dem Wert des direkten Ressourceneinsatzes. Der geringere Stahlanteil in Tunnelbauten und die längeren technischen Lebensdauer der Tunnelbauwerke reduziert den Zuwachs des kumulierten Materialaufwandes der Tunnelbauten im Vergleich zum direkten Materialaufwandes (rund 36 %) im Vergleich zu Brückenbauwerken, bei dem der Anstieg gegenüber dem direkten Ressourcenaufwand zwischen 52 % (Bestand vs. Instandhaltung) und 62 % (Bestand vs. Neu- und Ausbau) liegt.

3.5.3 Schieneninfrastruktur

Die Schieneninfrastruktur ist gekennzeichnet zum einen durch einen recht hohen Anteil an metallischen Rohstoffen, die bei der Betrachtung der kumulierten Materialbedarfe von besonderer Bedeutung sind, und zudem durch hohe Qualitätsanforderungen, die an diese metallischen Bauteile gestellt werden. So werden z.B. Schienen nur aus Primärstahl hergestellt; wir verwenden daher den MIT-Koeffizienten für Maschinenbaustahl der Hochofenroute. Ebenso werden hohen Anforderungen an die Güte der Oberleitungsdrähte aus Kupfer bzw. Kupfer-Legierungen gestellt. Da jedoch Kupfer ohne Qualitätsverluste rezykliert werden kann, teilen wir nicht die Annahme von Schmied/Mottschall (2010), die für den Kupferanteil der Oberleitungen 100 % Primärkupfer in ihren Berechnungen angesetzt haben. Wir verwenden einen MIT-Koeffizienten für 50 % Primär- und 50 % Sekundärkupfer, der gleichzeitig der Größenordnung der deutschen Kupfer-Recyclingquote entspricht (Erdman et al. 2004). In der Oberleitung wird zudem Bronze als Legierungsmetall eingesetzt. Bronze besteht zu rund 90 % aus Kupfer und zu 10 % aus Zinn (Wittmer 2006), so dass aus diesen Informationen der MIT-Koeffizient für Bronze gebildet werden kann. Für den Kupferanteil wird wiederum auf den 50/50 %-MIT-Koeffizient zurückgegriffen. Zu 10 % fließt der MIT-Koeffizient des deutschen Import-Mixes für Zinn in den MIT-Koeffizienten für Bronze ein. Für Teeröl wird schweres Heizöl als Näherungswert verwendet.

Tab. 50: Kumulierter Materialaufwand der Schieneninfrastruktur

in 1000 t		MIT-Koeffizienten in t/t	MA für Bestand	kum. MA Bestand	jährl. MA Neu- und Ausbau	kum. MA Neu- und Ausbau	jährl. MA Instandhaltung über Lebensdauer	kum. MA Instandhaltung	jährl. MA Instandhaltung über Ersatzbedarf	kum. MA Instandhaltung über Ersatzbedarf
Mineralische Rohstoffe	Sand-Kies	1,18	670.515	791.208	1936	2285	12.395	14.626	0	0
	Beton	1,33	137.565	182.962	1461	1943	2.517	3.347	63	84
	Granit	1,42	313.935	445.788	2840	4032	25.614	36.372	384	546
	Mauerwerk	2,11	99	208	1	2	0	0	0	0
Metalle	Bewehrungsstahl	1,47	4.667	6.860	54	80	85	124	5	8
	Schienen	8,14	13.354	108.705	98	800	437	3.561	10	82
	Eisen/Stahl	7,63	2.827	21.572	10	77	88	668	2	19
	Aluminium	18,98	134	2.541	2	33	2	42	1	23
	Kupfer	179,07	436	78.021	5	812	20	3.533	2	401
	Bronze	1009,76	46	46.944	1	646	5	4.753	0	155
Kunststoff	PE	2,49	396	986	4	10	15	37	1	4
	HDPE	2,52	3	6	0	0	0	0	0	0
Sonstige	Teeröl*	1,5	273	409	0	0	9	14	0	0
	Buchenholz	4,8	2.979	14.299	0	0	99	477	1	4
Summe			1.147.229	1.147.229	1.700.509	6.411	10.720	41.286	67.555	471

Quelle: Eigene Berechnung auf Basis von Wuppertal Institut (2003). *MIT-Koeffizient Schweröl

Der im Gegensatz zur Straßeninfrastruktur höhere Metallanteil am Materialbedarf der Schieneninfrastruktur führt zu einer stärkeren Erhöhung der Materialmengen bei der Abschätzung des kumulierten Materialbedarfs. Während der kumulierte Materialbedarf der Straßeninfrastruktur um 30 % über dem eigentlichen Materialbedarf liegt, ist er für die Schieneninfrastruktur um 50 % über dem Bestandwert des direkten Ressourcenaufwandes und fast 300 % über dem direkten jährlichen Materialbedarf für Instandhaltung, wenn er über den Ersatzbedarf bestimmt wird (letzte beide Spalten in Tab. 50). Die deutliche Erhöhung des kumulierten Materialaufwandes bei Instandhaltung über Ersatzbedarf erklärt sich aus dem hohen Ersatzbedarf der Oberleitungsdrähte. Der kumulierte Materialbedarf der jährlichen Materialmengen für den Neu- und Ausbau und die Instandhaltung über die technische Lebensdauer ist jeweils um knapp 70 % höher als die direkten Materialmengen. Die hohen MIT-Koeffizienten der metallischen Rohstoffe sorgen dafür, dass der Anteil der Metalle am Gesamtmaterialbedarf von 2 % bis 5 % auf 15 % (Bestand) bis 55 % (Instandhaltung über Ersatzbedarf) des kumulierten Materialaufwands ansteigt. Bei den jährlichen Flüssen für den Neu- und Ausbau bzw. die Instandhaltung geschätzt über die technische Lebensdauer liegt der Anteil der metallischen Rohstoffe am kumulierten Materialaufwand bei ungefähr 20 % bis 23 %.

3.5.4 Wasserstraßen

Durch den hohen Anteil an mineralischen Baustoffen in der Infrastruktur der Wasserstraßen ist der kumulierte Materialaufwand nicht übermäßig hoch im Vergleich zum direkten Materialinput. Teilweise wird durch die Verwendung von Abfallprodukten anderer industrieller Prozesse sogar ein MIT-Koeffizient von 0 angesetzt (Schlacke). An Stahl wird in Wasserstraßen, Schleusenbauwerken und Umschlaganlagen sowohl Spundwand- (Hochofenroute) als auch Bewehrungsstahl (Elektrolichtbogenroute) eingesetzt und mit den jeweiligen Koeffizienten multipliziert. Für Wasserbausteine wird der MIT-Koeffizient von Diabas verwendet.

Unter diesen Annahmen ergibt sich für die Infrastrukturen der Wasserstraßen folgender kumulierter Materialaufwand:

Tab. 51: Kumulierter Materialaufwand der Wasserstraßeninfrastruktur

	MIT-Koeff. (t/t)	Bestand	kum. MA des Bestandes	Jährl. Material- flüsse (Neu- und Ausbau)	kum. Material- aufwand (Neu- und Ausbau)	Jährl. Material- flüsse (Instand- haltung)	kum. Mate- rialauf- wand (In- standhal- tung)
in 1.000 t							
Sand, Kies	1,18	6.291	7.423				
Schotter, Splitt	1,42	23.397	33.224	485	689		
Wasserbausteine	1,42	22.906	32.527	9	13		
Schlacke, Grandgeröll	0	2.740	0				
Bitumensand**	1,2	1.552	1.862				
Mastixverguss**	1,22	1.201	1.465				
Ton*	1	36.058	36.058				
Asphaltbeton**	1,22	18.167	22.163				
Beton	1,33	68.203	90.710	1.079	1.435	32	43
Stahl (Hochofenroute)	7,63	5.206	39.722	29	221		
Stahl (Elektrolightbo- genofenroute)	1,47	2.569	3.776	34	50		
PVC	3,47	1.892	6.565				
Gesamt		190.182	275.497	1.636	2.408	32	43

Quelle: Eigene Berechnungen auf Basis von Wuppertal Institut 2003, *= kein MIT-Koeffizient vorhanden,
 **= MIT-Koeffizient geschätzt

3.6 Zusammenfassung Verkehrsinfrastrukturen

Die Materialbestände der deutschen Straßeninfrastruktur wurden über technische Straßenbaunormen, die den Aufbau verschiedener Straßenkategorien festlegen, für einen Quadratmeter Referenzstraße ermittelt und diese Werte auf der Basis von Referenzquerschnitten dann auf die bestehende Länge des deutschen Straßennetzes hochgerechnet. Die hier erfassten Materialmengen ergeben sich aus der Betrachtung der Straßenflächen der gesamten deutschen Straßeninfrastruktur sowie der Ingenieurbauwerke an Bundesautobahnen. Andere Bereiche, die ebenfalls der Straßeninfrastruktur zugerechnet werden können, wie Fuß- und Radwege, Lärmschutzwände oder Schutzplanken waren nicht Teil der Analyse.

Der Materialbestand im Bereich der Schieneninfrastruktur konnte im Verlauf des Projektes mit den Daten eines parallel durchgeführten UBA-Projektes (Schmied/Mottschall 2010) in großer Detailtiefe ermittelt werden. Die Hochrechnung der gespeicherten Materialmengen in der Wasserstraßeninfrastruktur, einschließlich Umschlaganlagen, basiert im Wesentlichen auf früheren Untersuchungen von Stiller (1995) und Mantein/Stiller (2000), welche am Wuppertal Institut durchgeführt wurden.

Die gespeicherte Menge an mineralischen Rohstoffen in der Straßeninfrastruktur übersteigt die der anderen Infrastruktursysteme um das Mehrfache. Im Bereich der Verkehrsinfrastruktur lassen die Straßen mit über 7,2 Mrd. Tonnen mineralischer Rohstoffe alle anderen Bereiche des Verkehrs weit hinter sich²¹. Die Schieneninfrastruktur ist mengenmäßig ebenfalls stark durch mineralische Baustoffe geprägt. Die metallischen Rohstoffe (vor allem Stahl, Kupfer, Aluminium und Bronze) sind mit über 20 Mio. Tonnen zwar nicht unbedeutend, machen jedoch im Vergleich zum Gesamtmaterialbestand von 1,15 Mrd. Tonnen lediglich knapp zwei Prozent aus. Hinzu kommen noch über 60 Millionen Tonnen an Beton und Stahl für die Ingenieurbauwerke der Bundesautobahnen und der Schieneninfrastruktur.

Der Materialbestand bei Wasserstraßen ist mit rund 190 Mio. Tonnen ebenfalls hoch und wird wie die anderen Infrastrukturbereiche durch mineralische Baustoffe dominiert.

Insgesamt sind in den von uns untersuchten Verkehrsinfrastrukturen rund 8,6 Mrd. Tonnen Baustoffe gespeichert, welche zu über 99 % aus mineralischen Rohstoffen bestehen (Tab. 52).

²¹ Im weiteren Verlauf wird deutlich werden, dass die Straßen auch im Vergleich mit den anderen Infrastrukturtypen den größten Material Stock darstellen.

Tab. 52: Übersicht über den Materialbestand im Verkehr

Material in 1.000 t		Straßen	Brücken, Tunnel	Schienen	Wasser- straßen	Verkehr gesamt
mineralische Rohstoffe	Sand, Kies	4.754.063		670.515	6.291	5.430.869
	Gesteinsmehl (Füller)	143.272				143.272
	Edelbrechsand	281.497				281.497
	Edelsplitt	1.305.251				1.305.251
	Schotter, Splitt	639.814			23.397	663.211
	Granit			313.935		313.935
	Mauerwerk			99		99
	Wasserbausteine				22.906	22.906
	Schlacke, Grandgeröll				2.740	2.740
	Mastixverguss				1.201	1.201
	Asphaltbeton				18.167	18.167
	Bitumensand				1.552	1.552
	Ton				36.058	36.058
	bit. Bindemittel	82.648				82.648
	hyd. Bindemittel	19.736				19.736
	Beton		57.191	137.565	68.203	262.959
metallische Rohstoffe	Stahl		4.380	20.848	7.775	33.003
	Aluminium			134		134
	Kupfer			436		436
	Bronze			46		46
Kunststoff / Sonstige	PE			396		396
	HDPE			3		3
	Geotextilien (1.000 m²)				21.443	21.443
	PVC				1.892	1.884
	Teeröl			273		273
	Buchenholz			2.979		2.979
Summe mineralische Rohstoffe		7.226.281	57.191	1.122.114	180.515	8.586.101
Summe metallische Rohstoffe		0	4.380	21.464	7.775	33.619
Summe Kunststoffe / Sonstige*		0	0	3.651	1.892	5.535
Gesamtsumme*		7.226.281	61.571	1.147.229	190.182	8.625.255

Quelle: Eigene Abschätzung, Details in den vorangegangenen Tabellen, *ohne Geotextilien

Die jährlichen Erneuerungsbedarfe im Straßen- und Schienennetz wurden über die Nutzungs- bzw. Lebensdauer hochgerechnet.²² Im Bereich der Wasserstraßen konnten die jährlichen Erneuerungsbedarfe nicht ermittelt werden. Hier gehen Erneuerung und Erweiterung insbesondere der Schleusen häufig Hand in Hand. Daher dominieren im Bereich der Wasserstraßen im Gegensatz zu Straße und Schiene die jährlichen Materialflüsse für Neubau und Erweiterung (Tab. 53).

²² Soweit keine detaillierten Informationen vorlagen, wird auch in den anderen Infrastrukturbereichen der Erneuerungsbedarf über die Lebensdauer ermittelt.

Tab. 53: Übersicht über die jährlichen Flüsse für Neubau und Erweiterung der Verkehrsinfrastrukturen

Material in 1.000 t		Brücken, Straßen		Schienen	Wasser- straßen	Verkehr gesamt
mineralische Rohstoffe	Gesteismehl	438				438
	Edelbrechsand	757				757
	Edelsplitt	3.695				3.695
	Sand	6.806				6.806
	Sand-Kies			1.936		1.936
	Kies, Schotter, Stein	9.107			485	9.592
	Granit			2.840		2.840
	Mauerwerk			1		1
	Wasserbausteine				9	9
	bit. Bindemittel	209				209
	hyd. Bindemittel	210				210
	Beton		1.145	1.461	1.079	3.685
metallische Rohstoffe	Stahl		89	162	63	314
	Aluminium			2		2
	Kupfer			5		5
	Bronze			1		1
Kunststoff / Sonstige	PE			4		4
Summe mineralische Rohstoffe		21.222	1.145	6.238	1.573	30.178
Summe metallische Rohstoffe		0	89	170	63	322
Summe Kunststoffe / Sonstige		0	0	4	0	4
Gesamtsumme		21.222	1.234	6.412	1.635	30.503

Quelle: Eigene Abschätzung, Details in den vorangegangenen Tabellen

Insgesamt sind die jährlichen Stoffflüsse im Bereich der Verkehrsinfrastrukturen - im Gegensatz zu den anderen Infrastruktursystemen - vor allem durch die Instandhaltung der Infrastruktur (Tab. 54) bestimmt. So ist der jährliche Materialbedarf für die Instandhaltung im Straßenbau (100 Mio. Tonnen) fünfmal höher als der des Neu- und Ausbaus (21 Mio. Tonnen). Dabei sind Gemeindestraßen sowohl beim Neubau als auch bei der Instandsetzung in absoluten Größen auf Grund der Länge des Straßennetzes der größte Verursacher von Stoffflüssen²³. Auch im Schienennetz geht der Großteil der jährlichen Stoffströme in die Instandhaltung der Strecken. Eine Erweiterung findet dort nur noch in geringem Maße statt.

²³ Pro Kilometer sind Autobahnen der ressourcenintensivste Straßentyp.

Tab. 54: Übersicht über die jährlichen Flüsse für Instandhaltung der Verkehrsinfrastrukturen

Material in 1.000 t		Straßen	Brücken, Tunnel	Schienen	Wasser- straßen	Verkehr gesamt
mineralische Rohstoffe	Gesteinsmehl	3.255				3.255
	Edelbrechtsand	4.958				4.958
	Edelsplitt	29.014				29.014
	Sand	27.465				27.465
	Sand-Kies			12.395		12.395
	Kies, Schotter, Stein	35.968				35.968
	Granit			25.614		25.614
	Mauerwerk					0
	bit. Bindemittel	2.336				2.336
	hyd. Bindemittel	813				813
	Beton		964	2.517	32	3.513
metallische Rohstoffe	Stahl		81	610		691
	Aluminium			2		2
	Kupfer			20		20
	Bronze			5		5
Kunststoff / Sonstige	PE			15		15
	Teeröl			9		9
	Buchenholz			99		99
Summe mineralische Rohstoffe		103.809	964	34.904	40.526	32
Summe metallische Rohstoffe		0	81	597	637	0
Summe Kunststoffe / Sonstige		0	0	120	123	0
Gesamtsumme		103.809	1.045	41.286	32	146.172

Quelle: Eigene Abschätzung, Details in den vorangegangenen Tabellen

4 Trink- und Abwasserinfrastruktur

Dieses Kapitel untersucht die Materiallager und –flüsse der Trink- und Abwasserinfrastruktur in Deutschland. Erfasst werden die wichtigsten Baumaterialien (mineralische Baustoffe, Metalle, Kunststoffe) im Bestand sowie die jährlichen Materialflüsse, die durch Neubau und Sanierung²⁴ der Trink- und Abwasserinfrastruktur induziert werden.

Es gibt bisher nur wenige Forschungsprojekte, welche sich mit dieser Thematik beschäftigen: So wird an der ETH Zürich (Abteilung Siedlungswasserwirtschaft der EAWAG) zum Materialbedarf und den Lagerbeständen der Wasserinfrastruktur der Schweiz im 20. Jahrhundert – hinsichtlich Status Quo und der historischen Entwicklung – geforscht mit dem Ziel, eine Grundlage für eine nachhaltige Umgestaltung der Infrastruktur zu bilden. Weitere Untersuchungen befassen sich mit der Integration der technischen Infrastruktur in Ökobilanzen (Buchert et al. 2004; Zimmermann et al. 1996; Siedentop et al. 2006) oder der Materialintensität einzelner Anlagentypen (Boermans-Schwarz 1998; Bringezu 1998; Bringezu 2000; Markus et al. 1996; Reckerzügl 1997; Venkatesh et al. 2009). Einen weiteren Schwerpunkt bilden Lebenszyklusanalysen und Öko-Bilanzierungen der Wasserinfrastrukturen (Tillmann et al. 1998; Dennison et al. 1999; Jekel et al. 2006; Doka 2007; Althaus et al. 2007; Lassaux et al. 2007; Hillenbrand 2009).

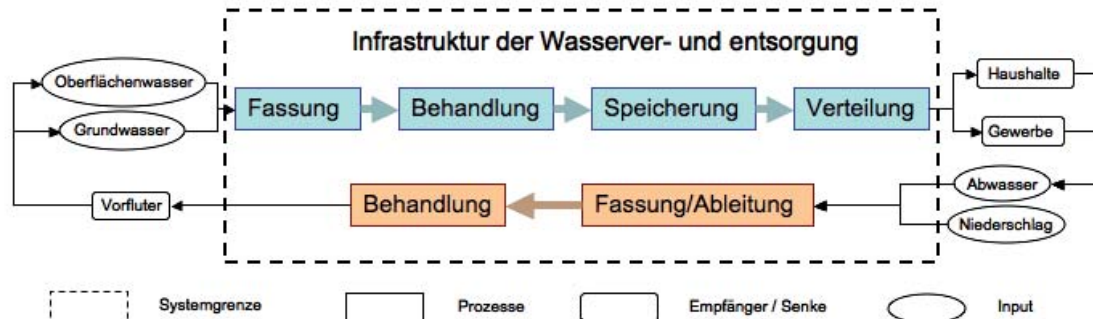
Grundlage der vorliegenden Berechnungen bilden umfangreiche Recherchen in einschlägiger (technischer) Fachliteratur, vorhandenen Ökobilanzierungen und Lebenszyklusuntersuchungen (s.o.). Darüber hinaus wurden die getroffenen Annahmen in Expertengesprächen und einem Expertenworkshop überprüft und ggf. angepasst. Die Anmerkungen werden jeweils kurz in den entsprechenden Abschnitten aufgeführt.

Insgesamt ist die Datensituation im Trink- und Abwasserbereich bezogen auf die Infrastruktur wenig zufrieden stellend. Die Leitungs- und Kanalnetze sind aufgrund ihres großen Anlagewertes und zu vermeidender Schäden hinsichtlich ihrer Materialverteilung relativ gut erfasst, es fehlen jedoch Daten zur Nennweitenverteilung und Gesamtkilometerzahl (Leitungsnetz). Für viele Systemkomponenten fehlen verlässliche Daten zur Gesamtmenge, so dass auf Schätzungen zurückgegriffen werden muss.

Wasserversorgung und Abwasserentsorgung sind – neben Energieversorgung, Nachrichtenversorgung und Abfallentsorgung – Teilsysteme der Ver- und Entsorgung. Abb. 4 veranschaulicht die Systemkomponenten der beiden Teilsysteme, welche – prinzipiell ähnlich - jedoch in ihrem Systemablauf spiegelbildlich verlaufen (Tietz 2006, 5):

²⁴ Die Veränderung des aktuellen Materialbestandes resultiert aus Neubau- / bzw. Rückbauaktivitäten sowie unterschiedlichsten Sanierungsverfahren (Reparatur, Renovation, Erneuerung). Reparaturen sind in den jährlichen Flüssen nicht berücksichtigt, da es sich hierbei um die Behebung örtlich begrenzter Schäden handelt. Diese sind in der Regel mit geringem Materialaufwand verbunden und nicht belastbar quantifizierbar.

Abb. 4: System der Wasserver- und Abwasserentsorgung



Quelle: Eigene Darstellung

Es findet gewissermaßen ein Stoffwechsel (Metabolismus) statt, welcher sich in den gesamten „urban metabolism“ (Baccini/Brunner 1991; Baccini et al. 2001; Blum/Stutzriemer 2007) einfügt. Neben dem Ziel der Systemoptimierung, indem die zunächst linear ausgelegten Systeme in Kreisläufe umgewandelt werden (Tietz 2006, 3), kann eine Ressourcenschonung auch durch einen reduzierten Materialverbrauch im Funktionsablauf erfolgen.

Unter der Wasserversorgung werden nach Tietz (2006, 190) alle Einrichtungen und Anlagen zur leitungsgebundenen Versorgung der Siedlungen mit der natürlichen Ressource Wasser als Trink- und Nutzwasser verstanden. Die Wasserversorgung umfasst die Gewinnung von Rohwasser (Oberflächen- und Grundwasser) aus Brunnen, Quellen, Talsperren oder Uferfiltrat und seine Aufbereitung zu Trink- und Brauchwasser sowie seine Verteilung, um eine flächendeckende Versorgung der privaten Haushalte mit Trinkwasser sowie der Industriebetriebe und Kraftwerke mit Brauchwasser zu gewährleisten. Da die Ressource Wasser in der Regel nicht flächendeckend am Ort ihres jeweiligen Bedarfes und in den jeweils erforderlichen Eigenschaften auftritt, ist ein umfangreiches System, bestehend aus Infrastrukturen und technischen Anlagen zur Fassung, Behandlung, Speicherung und Verteilung, notwendig, um eine solche flächendeckende, qualitative Versorgung gewährleisten zu können.

Das System Abwasserentsorgung dient dazu, die Siedlungsflächen von Abwasser (Schmutzwasser und Regenwasser) zu entsorgen und dieses – großteils gereinigt – wieder dem natürlichen Wasserkreislauf zuzuführen. Das Abwasser wird zunächst gesammelt und dann meist unterirdisch in Abwasserleitungen unter Ausnutzung des natürlichen Gefälles einer Behandlungsanlage (Kläranlage) und dann einem Vorfluter zugeführt (Tietz 2006, 228). Die Abwasserentsorgung leistet einen wichtigen Beitrag zur Umwelthygiene, indem sie auf eine Verhinderung oder Minderung von Schadstoffbelastungen abzielt. Sie umfasst zum einen die Sammlung, Ableitung und Reinigung

von Schmutzwasser sowie zum anderen die Sammlung, Ableitung (und teilweise Reinigung) von Regenwasser.

Im Rahmen des Projektes werden lediglich öffentliche Anlagen betrachtet – endend an der jeweiligen Privatgrundstücksgrenze. Damit liegen sämtliche Grundstücks- und Hausanschlüsse und –leitungen außerhalb der Betrachtung. Obgleich zahlenmäßig relevant, liegen für den privaten Bereich so gut wie keine Daten vor. Liegenschaften des Bundes und anderer Gebietskörperschaften sind Teil der Grundstücksentwässerung und liegen somit auch im privaten Zuständigkeitsbereich (Stein 2004). Auch Anschlusskanäle, obgleich gemäß Deutschem Normenwerk zum öffentlichen Zuständigkeitsbereich der Kanalisation gehörend, werden nicht betrachtet, da sie vom Statistischen Bundesamt nicht mit erfasst werden (Destatis 2009, Tab. 7).

4.1 Materialbestände und –flüsse der Infrastrukturen der Wasserversorgung

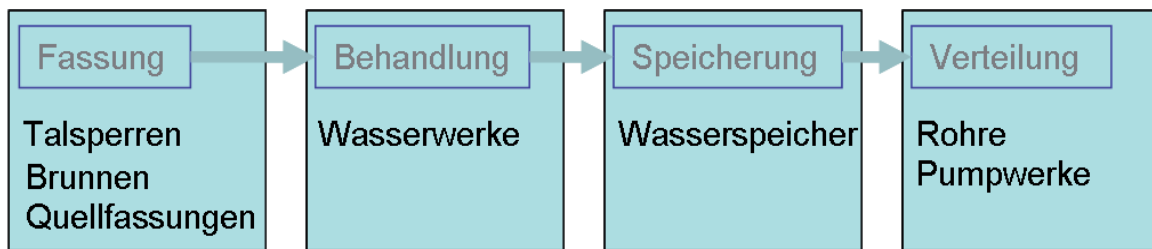
Die Trinkwasserversorgung fällt grundsätzlich in die Verantwortung der Gemeinden im Rahmen ihres Auftrags zur Daseinsvorsorge. Die Städte und Kommunen können diese Pflichtaufgabe hoheitlich wahrnehmen oder privatrechtlich organisierte Unternehmen mit der Durchführung beauftragen. Derzeit gibt es in Deutschland etwa 6.400 Betriebe der Wasserversorgung (ATT et al. 2008).

Die zentrale öffentliche Trinkwasserversorgung in Deutschland besteht in ihren Grundzügen seit mehr als 100 Jahren und wird fortlaufend den technischen und hygienischen Erfordernissen angepasst. Kennzeichnend sind selten auftretende Rohrbrüche und eine im globalen Vergleich sehr hohe hygienische Sicherheit mit überaus niedrigen Wasserverlusten (BMU 2006). Zur Gewährleistung der Versorgungssicherheit und einer hinreichenden Trinkwasserhygiene besteht grundsätzlich ein in den jeweiligen kommunalen Satzungen geregelter Anschluss- und Benutzungszwang. Der Anschlussgrad der Bevölkerung an das Netz der öffentlichen Trinkwasserversorgung liegt daher bei über 99 % (ATT et al. 2008). Allerdings ging in den letzten 15 Jahren die entnommene Wassermenge in allen Bereichen spürbar zurück (Destatis 2009). Ursachen liegen in verändertem Verbraucherverhalten sowie verstärkter Kreislauf- und Kaskadennutzung in der Industrie.

Die Infrastruktur der Wasserversorgung bedarf v.a. in den städtischen Regionen (wie, in noch größerem Ausmaß, die Abwasserinfrastruktur) durch ihr hohes Alter großer Sanierungs- und Instandhaltungsmaßnahmen (BMU 2006). Darüber hinaus führen geänderte Rahmenbedingungen (demographischer Wandel, Klimawandel) zu modifizierten Anforderungen an die Netze, welche sich entsprechend anpassen müssen.

Zur Sicherstellung einer flächendeckenden qualitativ hochwertigen Wasserversorgung ist eine aufwändige Infrastruktur mit hohen Erschließungskosten erforderlich. Vielfältige technische Anlagen zur Wassergewinnung, -aufbereitung, -speicherung sowie -verteilung sind notwendig (ATT et al. 2008). Den einzelnen Prozessschritten in der Wasserversorgung lassen sich folgende Anlagen zuordnen:

Abb. 5: Anlagen der Wasserversorgung



Quelle: Eigene Darstellung

Nach einer kurzen Einführung in den jeweiligen Infrastrukturtyp werden die jeweiligen Materialbestände und –flüsse detailliert hergeleitet.

4.1.1 Talsperren

Charakteristisch für Deutschland ist die bevorzugte Nutzung örtlicher Ressourcen für die (Trink-) Wassergewinnung. Geringe jährliche Niederschlagsmengen, geologische Bedingungen, touristische Nutzung sowie große Ballungsgebiete erfordern jedoch in einigen Regionen Deutschlands, dass ein Teil des Wasserbedarfs aus Talsperren (Sachsen, Thüringen) oder durch Fernwasserversorgungen (Schwäbische Alb, Neckareinzugsgebiet, Halle-Leipzig) gedeckt wird (BMU 2006). Talsperrengestützte Wasserversorgungssysteme finden sich vorwiegend an kleinen Flüssen mit unregelmäßigem Dargebot, an denen sich über Jahrzehnte eine Absicherung der Wasserversorgung über Talsperren entwickelt hat. Diese befinden sich überwiegend an der Ruhr, in Thüringen, in Sachsen und im Harz. Insgesamt beziehen in Deutschland 14 Mio. Menschen ihr Trinkwasser direkt aus Talsperren oder ihre Versorgung wird durch Talsperren abgesichert (DTK 2003). Zwölf Prozent des Trinkwassers in Deutschland werden daher aus See- bzw. Talsperrenwasser gewonnen (Destatis 2009).

Eine Talsperre ist nach DIN 4048 definiert als „eine Stauanlage, die über den Querschnitt des Wasserlaufs hinaus den ganzen Talquerschnitt absperrt“. Sie besteht in der Regel aus der Hauptsperre (Absperrbauwerk) mit Speicherbecken und Vorsperren, diese wiederum mit Stau- oder Speicherbecken“ (Rißler 1998). Viele Talsperren erfüllen als sog. Mehrzweck-Talsperren mehrere der folgenden Funktionen (DTK 2003): Energiegewinnung, Energiespeicherung, Versorgung mit Trink- und Brauchwasser, Hochwasserschutz, Erholung und Freizeit.

Ermittelter Gesamtmaterialbestand

311 Talsperren erfüllen die Kriterien der ICOLD (International Commission on Large Dams) als so genannte „große“ Talsperren. Über die Gesamtzahl aller Talsperren und Staudämme in Deutschland liegen keine Zahlen vor, sie dürfte jedoch in etwa doppelt bis dreifach so hoch sein und viele kleinere Anlagen umfassen. Im internationalen

Vergleich sind die Talsperren in Deutschland relativ klein: 70 % der Bauwerke haben ein Volumen kleiner 500.000 m³. Die Höhe der Talsperren in Deutschland variiert von 20 m bis 100 m, jedoch ist der Großteil weniger als 30 m hoch (DTK 2003, 8; ICOLD 2003).

Unsere Berechnungen umfassen jene 308 Talsperren, welche in DTK 2001 aufgelistet sind und bezüglich Bauwerks-Volumen und Typ relativ gut dokumentiert sind (DTK 2001; LTV Sachsen 2007; Roscher 2006)²⁵.

Talsperren sind bedingt durch ihre Größe sehr materialintensiv: das volumenmäßig mächtigste Absperrbauwerk in Deutschland ist der Damm des Brombachspeichers (Erddamm mit Innendichtung) in Bayern mit 3.500.000 m³ (DTK 2001).

Grundsätzlich können Staumauern und Staudämme unterschieden werden: Staumauern bestehen aus den Baustoffen Bruchsteinmauerwerk (bis etwa 1930) oder Beton, die Dämme aus Erd- oder Felsschüttungen (teilweise mit Betonkern) mit einer Dichtung aus feinkörniger Erde, Beton oder Asphaltbeton oder Folien (Rißler 1998, 81). Aufgrund der geologischen Bedingungen sowie verbesserter Erdbautechnik wurden in Deutschland in den letzten Jahrzehnten hauptsächlich Staudämme gebaut. Es dominieren mit 50 % Erddämme, gefolgt von Steinschüttdämmen (Tab. 55). In Kombination mit erheblich größeren durchschnittlichen Bauwerksvolumina wird deutlich, dass im Bereich der Talsperren natürliche Baustoffe (Kiese, Sande, gebrochenes Felsmaterial) dominieren. Von den meisten Bauwerken liegen Daten über das Volumen vor (DTK 2001; LTV 2007; Roscher 2006). Fehlende Angaben wurden über das Durchschnittsvolumen der jeweiligen Bauwerkstypen ermittelt.

Tab. 55: Talsperren nach Bauwerkstyp und Bauwerksvolumen

Bauwerkstypen	Anzahl	Anteil	durchschn. Volumen (m ³)	Gesamt Volumen (m ³)
Erddämme (TE)	156	51 %	404.809	63.150.151
Steinschüttdämme (ER)	61	20 %	805.093	49.110.664
Gewichtsstaumauern (PG) Beton	44	14 %	123.098	5.416.295
Gewichtsstaumauern (PG) Bruchstein	41	13 %	68.195	2.795.990
Pfeiler-Staumauer (CB)	1	0 %	123.000	123.000
Gewölbe-Staumauer (VA)	2	1 %	72.500	145.000
Gewölbereihen-Staumauer (MV)	1	0 %	7.000	7.000
Stauwehr (W)	2	1 %	50.000	100.000
Gesamt	308			120.848.100

Quelle: Eigene Berechnungen auf der Grundlage verschiedener Quellen (DTK 2001; LTV 2007; Roscher 2006), Einteilung verändert nach ICOLD

Nur bei geringen Stauhöhen ist die Konstruktion von **Staudämmen** aus einem einheitlichen Schüttstoff möglich – meist ist der Staudamm zonal unterteilt in Dichtungs-,

²⁵ Es ist davon auszugehen, dass es sich bei den drei kürzlich hinzugekommenen Sperren um Erd- oder Steinschüttdämme handelt.

Stütz- und Drainagekörper (Dachroth 2002). Die Dichtungskörper werden entweder als Oberflächendichtung auf der wasserseitigen Dammoberfläche oder als Innendichtung im Dichtungskern angebracht. Als Dichtungselemente kommen Erdstoffdichtungen, Betondichtungen, Asphaltdichtungen, Kunststoffdichtungen und Spundwände zum Einsatz. Aufgrund der mangelnden Datenlage und vernachlässigbarer Mengen (abgesehen von den häufigen Erdstoffdichtungen sind die Dichtungskerne meist schmal) werden diese jedoch nicht betrachtet. Das Material für den Stützkörper kommt meist aus dem Flussbett selber oder aus der näheren Umgebung. Für verdichtete Erdstoffe gehen wir von einer Einbaudichte von $2,0 \text{ t/m}^3$ aus, für Naturstein von $1,6 \text{ t/m}^3$.

Bruchsteinmauern wurden um die Jahrhundertwende 19. / 20. Jahrhundert gebaut und sind meist vom sogenannten „Intze-Typ“ nach Prof. Otto Intze aus Aachen. Sie sind meist in bogenförmiger, monolithischer Ausführung aus vor Ort vorhandenem Naturstein mit Kalk-Trass-Mörtel gebaut. Sanierungen und Anpassungen an die Regeln der Technik sind zu fast 100 % erfolgt. Bruchsteine haben eine Rohdichte von ca. $2,7 \text{ t/m}^3$.

Ab den 1930er Jahren ersetzte zunehmend Beton die Bruchsteine als Baustoff beim Bau der Gewichtsstau Mauern. Dieser Spezialbeton wurde zumeist vor Ort hergestellt und durch Kunststoff-Fugenbänder und Kupferbleche abgedichtet. Die Betonzuschläge kamen häufig aus Steinbrüchen vor Ort, als Betonzusatzstoff wurde Flugasche verwendet. Als Zement wurde häufig Hochofenzement verwendet. Die Betondichte bei Stau Mauern liegt in der Regel zwischen $2,3$ und $2,5 \text{ t/m}^3$, hier liegt den Berechnungen die geringere Dichte von $2,3 \text{ t/m}^3$ zugrunde. Der Stahlverbrauch für die Talsperren ist relativ gering und wird vernachlässigt. Bei Vollmauern wird fast durchweg unarmerter Beton verwendet. Pfeiler-, Gewölbe- und Gewölbereihenstau Mauern sowie Stauwehre²⁶ werden ebenfalls in Betonbauweise erstellt.

In den meisten Fällen sind umfangreiche Untergrundabdichtungen mittels Zementinjektionen notwendig. Meistens wird in die Bohrlöcher reiner Zement eingepresst, gelegentlich auch Mischungen mit Ton, Bentonit und Chemikalien. Daten sind jedoch nur wenige publiziert (z.B. Zillierbach, Rappbode) und unterscheiden sich sehr in Abhängigkeit von den lokalen Gegebenheiten. Daher sind diese Mengen nicht hochrechenbar. Aus dem gleichen Grund und aufgrund vernachlässigbarer Mengen werden Armaturen, Hochwasserentlastungsanlagen und Stollen vernachlässigt.

Tab. 56 Materialbestand Talsperren in Deutschland

Material (1.000 t)	Gesamt	davon für Wasserkraft	netto
Kiese, Sande	126.300	9.132	117.168
Naturstein	86.126	30.668	55.458
Beton	13.320	3.973	9.347
Gesamt	225.746	43.773	181.973

Quelle: Eigene Berechnungen

²⁶ Das Bauvolumen für die Stauwehre wurde aufgrund fehlender Daten auf durchschnittliche 50.000 m^3 geschätzt.

Insgesamt sind nach unseren Berechnungen in den 308 großen Talsperren Deutschlands knapp 130 Millionen Tonnen Erdstoffe, knapp 90 Millionen Tonnen Natursteine und gut 13 Millionen Tonnen Beton gespeichert (Tab. 56). Ausgehend von einem durchschnittlichen Zementgehalt von 200 kg/m^3 ²⁷ ist somit von knapp 1,2 Mio. Tonnen Zement allein in den Beton-Staumauern auszugehen (ohne Stollen, Injektionen, Betonbauwerke in Staudämmen).

Rechnet man die Wasserkraft heraus (43 Dämme und Staumauern, welche überwiegend der Energieversorgung dienen und im Besitz von Energieversorgungsunternehmen sind), so bleiben noch gut 180 Millionen Tonnen Bestand, davon zum Großteil Erdbaustoffe (Kiese, Sande, Natursteine).

Ermittlung der jährlichen Materialflüsse

Absperrbauwerke sind im allgemeinen für eine sehr lange Lebensdauer ausgelegt – ca. 80 – 100 Jahre. Darüber hinaus sind sie so zu konstruieren, dass die geplante Lebensdauer nach einer Sanierung ohne großen Aufwand wesentlich verlängert werden kann (DTK 2003). Die vorerst letzte große Talsperre in Deutschland, Leibis/Lichte in Thüringen, wurde 2005 fertig gestellt.

In Deutschland steht demnach die Unterhaltung der bestehenden Anlagen im Vordergrund. Durch gewandelte Zweckbestimmungen und Anforderungen an Talsperren (insb. bzgl. Hochwasserschutz) können darüber hinaus bauliche Anpassungen und betriebliche Veränderungen notwendig werden (Rißler 1998). Teilweise werden Talsperren rückgebaut: Beispiele sind die Talsperre Krebsbach in Thüringen oder die Herbringhauser Talsperre in Wuppertal (Thüringer Fernwasser 2010).

Zukünftige Bauprojekte von Talsperren und Dämmen betreffen hauptsächlich Anlagen zur Energieerzeugung²⁸ und zur Hochwasserregulierung. Mit der Häufung extremer Wetterverhältnisse steigt in Zukunft der Bedarf an zusätzlichem Rückhalteraum für Hochwasser- und Niedrigwasserperioden jedoch wieder an und könnte zu zunehmender Bautätigkeit führen (Preußner 2007). Tab. 57 gibt einen Überblick über aktuelle Neubauprojekte im Talsperren- / Speicherbau.

²⁷ Wir gehen hier von einem geringeren Zementgehalt aus als Ecoinvent für die Schweiz mit 230 kg/m^3 , da in Deutschland Gewichtsstaumauern dominieren, welche einen höheren Anteil an magerem Beton ($140\text{--}180 \text{ kg/m}^3$) aufweisen (Bauer et al. 2007),

²⁸ Im Zusammenhang mit der stärkeren Erzeugung erneuerbarer Energien erfahren Pumpspeicherwerke zurzeit eine Renaissance. Konkret sind in Deutschland zwei neue Groß-Projekte in Vorbereitung: PSW Blaubeuren der Stadtwerke Ulm / Neu-Ulm und das PSW Atdorf der Schluchseewerke AG (BEE 2009). Beide werden der Wasserkraft zugerechnet.

Tab. 57: Neubauprojekte im Talsperren- / Speicherbau

Name	Bundesland	Bauweise	Fertigstellung	Nutzung	Höhe ü. Talsohle	Kronenlänge	Volumen (m³)
Lauenstein	Sa	Steindamm mit Asphaltbetoninnendichtung	2006	H	41,4	260	480.000
Drachensee (Furth im Wald)	Bay	Erddamm mit Innendichtung	2008	H, E	11	170	NA
Goldbergsee	Bay	Erddamm mit Innendichtung	2010	H	7	290	NA
Rennersdorf	Sa	Steinschüttdamm mit Asphaltbetoninnendichtung	2010	H	15	260	160.000
Wippra	S-A	Erddamm	2011	H	17	190	NA
Wolterdingen	BW	Erdschüttdamm	2011	H	18	460	300.000
Straßberg	S-A	Erddamm	2012	H	19	260	NA
Meisdorf	S-A	Erddamm	2013	H	15,5	117,5	NA
Neuwürschnitz	Sa	Steinschüttdamm mit Asphaltbetoninnendichtung	2013	H	12,5	535	NA
Querfurth	S-A	Homogener Erddamm	2013	H	7	140	NA
Niederseidewitz	Sa	Steinschüttdamm mit Asphaltbetoninnendichtung	2015	H	32	140	NA

Quelle: LfU Bayern (2009a), LTV Sachsen (2009), LTV Sachsen (2010), Regierungspräsidium Freiburg (2008), Talsperrenbetrieb Sachsen-Anhalt (2010)

In allen Fällen handelt es sich um Schüttdämme aus Erdbaustoffen und/oder Natursteinen, welche vergleichsweise kleiner sind als bereits bestehende Dämme. Folgende Annahmen werden getroffen:

- Pro Jahr wird ein Erd- oder Steinschüttdamm gebaut (0,7:0,3)
- Das durchschnittliche Bauwerksvolumen beträgt für Erddämme 150.000 m³, für Steinschüttdämme 300.000 m³.

Damit ergibt sich folgender geschätzter Materialinput durch Neubau:

Tab. 58: Jährliche durchschnittliche Zunahme Talsperren / Dämme durch Neubau

Material	In 1.000 t
Kiese / Sande	210
Natursteine	144
Gesamt	354

Quelle: Eigene Schätzung, Dichte Kiese / Sande 2.000 kg/m³, Schüttdichte Natursteine 1.600 kg/m³

Ein Rückbau von Dämmen oder Staumauern erfolgt in der Regel nicht. In den meisten Fällen erfolgt eine fortlaufende Nutzung als Naherholungsziel. In Thüringen wurde als erste Talsperre in Deutschland in 2007 die Talsperre Krebsbach rückgebaut. Die einzelnen Fraktionen werden dabei zum Teil vor Ort für die neu zu errichtenden Bauwerke

ke (Wartungs- und Wanderweg, Sohlgleitung, Erosionsschutzbuhnen) verwendet. Überschüssiges Dammmaterial wird in einen Seitendamm eingebaut. Abbruchmaterialien der Hoch- und Tiefbauten sowie die ausgebauten technologischen Ausrüstungen wurden abtransportiert und entsorgt oder verwertet (Thüringer Fernwasser 2010).

Legt man eine Lebensdauer von 80 Jahren zugrunde, so sind aktuell alle Talsperren mit Baujahr bis 1930 zu sanieren²⁹, das sind 61 Bauwerke (= 20 %). Davon sind 32 Bauwerke bereits saniert, so dass 29 aktuell zu sanierende Dämme und Staumauern verbleiben (davon 7 Absperrbauwerke, die hauptsächlich der Wasserkraft zugeordnet werden können). Für die verschiedenen Bauwerkstypen gibt es eine Vielzahl von Sanierungsvarianten, die im Einzelfall spezifisch ausgewählt werden. Daher ist eine Ermittlung der jährlichen Flüsse für Sanierungsarbeiten nicht leistbar.

4.1.2 Brunnen

Mit 62 % wird der überwiegende Teil der Wasserversorgung in Deutschland aus Grundwasser gespeist (Destatis 2009). Man unterscheidet im Allgemeinen zwei Arten von Grundwasserfassungen: vertikale und horizontale Fassung. Bei vertikaler Fassung werden neben den zahlenmäßig unbedeutenden Schlag- und Schachtbrunnen hauptsächlich Vertikalfilterbrunnen (Bohrbrunnen) genutzt. Bei der horizontalen Fassung dominieren Horizontalfilterbrunnen. Auch bei der Gewinnung von Uferfiltrat kommen Brunnen zum Einsatz. Für die Grundwassergewinnung im Rahmen der zentralen Wasserversorgung werden hauptsächlich Vertikalfilterbrunnen eingesetzt.

Meistens liegen Brunnen und Wasserwerke direkt beieinander. Häufig wird aber auch ein Wasserwerk von mehreren Brunnen bedient. Deshalb ist es schwierig, eine genaue Anzahl von Brunnen in Deutschland zu ermitteln. Teilweise verfügen die Landesbehörden über detaillierte Zahlen zu den genutzten Brunnen: In Bayern werden nach Informationen des Bayerischen Landesamts für Umwelt bspw. 4.500 Brunnen für die öffentliche Trinkwassergewinnung genutzt (von 2.400 Versorgungsunternehmen). Eine Gesamtanzahl für Deutschland liegt bisher nicht vor. Die Tiefen der Brunnen sind darüber hinaus je nach Tiefe der Grundwasser führenden Schichten sehr unterschiedlich.

Erste Materialintensitätsanalysen wurden beispielhaft für die Brunnen der Stadtwerke Düsseldorf durchgeführt (Westerhof 2001). Die 74 Vertikalbrunnen und 1 Horizontalbrunnen fördern eine Mischung aus uferfiltriertem Rheinwasser und Grundwasser aus der Region. Folgende Größenordnungen wurden ermittelt:

²⁹ Der Großteil der Bauwerke ist in den 1930er bis 1980er Jahren gebaut worden, so dass bis zum Jahr 2070 mit weiteren Sanierungsvorhaben zu rechnen ist.

Tab. 59: Beispieldaten zur Materialintensität von Brunnen

Vertikalbrunnen (20 m Tiefe)	Stahl	0,72 t
Horizontalbrunnen (15 m Tiefe)	Kupfer	6,68 t
Horizontalbrunnen (15 m Tiefe)	Beton	106,03 t

Quelle: Westerhof (2001)

Mit zunehmender Betriebszeit lässt die Brunnenleistung verschleißbedingt nach, der Brunnen „altert“. Teilweise sind Brunnensanierungen notwendig. Brunnen (und Grundwassermessstellen), die auf Dauer außer Betrieb genommen werden oder nicht mehr zu sanieren sind, müssen zum Schutz des Grundwassers endgültig zurückgebaut werden. Der Brunnen wird entsprechend der geologischen Verhältnisse verfüllt und nachgedichtet. Teilweise wird der Brunnenausbau vollständig oder nur zum Teil entfernt.

Aufgrund der vergleichsweise geringen Relevanz als Materiallager im Gesamtsystem sowie unter Berücksichtigung der nicht ausreichenden Datensituation wurde jedoch von einer weiteren Bearbeitung abgesehen.

4.1.3 Quellwasserfassungen

Quellfassungen zur Wassergewinnung sind althergebrachte Bauweisen. Die Bauart der Quellfassungen hängt von der Art und Ursache des Zutagetretens des Grundwassers ab. Man unterscheidet aufsteigende (artesische) und absteigende oder seitlich austretende Quellen. Der Quellwasseranteil an der Wassergewinnung der öffentlichen Wasserwerke hat ständig abgenommen und stagniert derzeit bei ca. 8 % der Gesamtförderung (Mutschmann/Stimmelmayer 2007; Destatis 2009).

Es ist schwierig, eine genaue Anzahl von Quellfassungen in Deutschland zu ermitteln. Teilweise verfügen die Landesbehörden über detaillierte Zahlen zu den genutzten Quellfassungen: In Bayern werden nach Informationen des Bayerischen Landesamts für Umwelt bspw. 7.100 Quellfassungen für die öffentliche Trinkwassergewinnung genutzt (LfU Bayern 2010). Die Wahl der Baustoffe ist abhängig von der Beschaffenheit des Quellwassers. Zumeist Beton- und Lettendecken (aus Ton) zur Abdichtung, Waschkies. Sickerrohrleitungen bestehen aus Steinzeug, Beton, Faserasbestzement, Stahl (mit Schutzüberzug). Bei Aufgabe müssen Quellfassungen zwingend rückgebaut werden, so dass die Materialien potenziell wieder in die Stoffkreisläufe eingehen können: Aufgrund der besonderen Bedeutung natürlicher Quellaustritte soll der Rückbau von Quellen zu einer weitgehenden Wiederherstellung der ursprünglichen Situation führen (Mutschmann/Stimmelmayer 2007).

Analog zu den Brunnen haben wir aufgrund der untergeordneten Bedeutung der Quellfassungen als Materiallager verbunden mit ihrer Inhomogenität und der unzureichenden Datensituation von einer weiteren Bearbeitung der Quellfassungen abgesehen.

4.1.4 Wasserwerke

Häufig enthält das Grund- oder Oberflächenwasser Stoffe, die gesundheitsschädigend oder wegen ihres Geruchs oder Geschmacks unerwünscht sind oder zu technischen Störungen führen können. Um den qualitativen Ansprüchen der Nutzer (Haushalte, Gewerbe, Industrie, öff. Einrichtungen) zu entsprechen, muss das Rohwasser in den meisten Fällen zu Trinkwasser oder Brauchwasser technisch aufbereitet werden. Dies geschieht in Wasseraufbereitungsanlagen (hier: Wasserwerke).

An Aufbereitungszielen werden unterschieden:

- Die Entfernung geogener Stoffe,
- die Entfernung anthropogener Stoffe,
- der Schutz des Verteilungsnetzes,
- sowie die technische Verwendbarkeit (BMU 2006).

Nach den allgemein anerkannten Regeln der Technik bietet sich eine Vielzahl von technischen Möglichkeiten, diese Aufbereitungsziele zu erreichen, die auf physikalischen, chemischen oder biologischen Vorgängen beruhen. Das Wasser wird zunächst einer Reinigungsanlage mit Grob- und Feinfilter zugeführt. Danach folgt in den meisten Fällen eine Entkeimung, häufig durch Chlorung, seltener mit ultravioletter Bestrahlung oder Ozonierung (Beigabe von Ozon).

Folgende Verfahren kommen schrittweise nacheinander zur Aufbereitung von Grundwasser zur Anwendung:

Tab. 60: Verfahren der Grundwasseraufbereitung und erforderliche Anlagen

Aufbereitungsverfahren	Anlagen
Vorreinigung	Rechen; Siebe, auch Mikrosiebe; Sandfang
Flockung, Fällung	Rührbecken; Rohre; Dosieranlagen für Al- und Fe-Salze, Kalk, Polymere; Misch- und Rührreinrichtungen; evtl. Schwebbett; evtl. Flockenrückführung
Sedimentation	Absetzbecken, Lamellenseparatoren, Pulsatoren u.a.
Gasaustausch	Wellbahn-, Kaskaden oder Flachbodenbelüfter; früher auch Verdüsen; auch Füllkörperkolonnen
Oxidation, Desinfektion	Ozonerzeugungsanlagen; Reaktionsbehälter; Begasungskammer
Filtration	Schnellfilter als offene oder geschlossene (Druck-) Filter; Langsamfilter; Sonderfall: Feinfiltersysteme / Mechanisch wirkende Filter
Membranverfahren	Ultra-, Mikro-, Nanofilter
Adsorption	Aktivkohlefilter; spezielle Adsorptionsfilter
Chem. „Neutralisation“	Filtration über Kalkstein oder halbgebrannte Dolomite
Biol. Denitrifikation	Festbettreaktoren; auch fluidisierte Reaktoren; Substratzugabe
Ionenaustausch	Kationen- / Anionen- / Mischbettauwechsler
Zugabe von Inhibitoren	Dosieranlagen für Phosphate / Silikate

Quelle: Eigene Zusammenstellung nach Mutschmann/Stimmelmayer (2007)

Die Anforderungen an die Aufbereitungstechnik passen sich im Laufe der Zeit den veränderten Bedingungen an, wie größer werdende Verteilungsnetze und damit verbunden längere Aufenthaltszeiten des aufbereiteten Trinkwassers vom Wasserwerk zum Verbraucher (BMU 2006). Die Wasseraufbereitung muss individuell, immer auf das jeweilige Wasservorkommen abgestimmt, entworfen werden. Daher sind die Wasserwerke jeweils hinsichtlich ihrer Ausstattung sehr unterschiedlich.

Eine Wasseraufbereitungsanlage besteht aus den folgenden Anlageteilen, die meist getrennt ausgeschrieben, vergeben und ausgeführt werden (Mutschmann /Stimmelmayr 2007):

- Aufbereitungs- und maschinentechnischer Teil,
- elektrotechnischer Teil,
- Mess- und Steuereinrichtungen,
- bauliche Anlagen.

Wesentliche Bestandteile von Wasserwerken sind Filter und Pumpen sowie Wasserspeicher. Da die Gebäude sehr unterschiedlich sein können, empfiehlt sich nur eine Betrachtung der technischen Einrichtungen und der Massen für die Speicher.

Ermittelter Gesamtmaterialbestand

Die Anzahl der Wasserversorgungsunternehmen in Deutschland nach Bundesländern und Größenklassen des Wasseraufkommens kann der offiziellen Statistik (Destatis 2009, Tab. 3) entnommen werden: Es gibt nach Angaben des Statistischen Bundesamtes 4.833 Wasserunternehmen, die selber Wasser fördern und 6.211 Wasserversorger insgesamt (Tendenz sinkend). Einige Versorgungsunternehmen betreiben jedoch mehrere Wasserwerke. 1991 gab es in Deutschland (inkl. der Neuen Bundesländer) 8.160 Anlagen zur Wasseraufbereitung (Destatis 1994). Eine aktuellere Gesamtzahl ist nicht vorhanden. Diese fördern insgesamt eine Wassermenge von 5,1 Mrd. m³ Wasser (Destatis 2009).

Unsere Berechnungen basieren auf den EcolInvent-Daten von Althaus et al. 2007. Diesen liegt eine Beispiel-Anlage aus der Schweiz (Marin) mit einer Gesamtförderung von 1,2 Mio. m³ Wasser zugrunde. Jedoch ist zu berücksichtigen, dass Althaus et al. für die Bauphase der Infrastrukturen lediglich grobe Überschlagsrechnungen vornehmen, da sie im Vergleich zur Betriebsphase von untergeordneter Bedeutung ist.

Die EcolInvent-Daten lassen sich zum einen nach der Anlagenzahl, zum anderen nach der Fördermenge hochrechnen. Es ist jedoch anzumerken, dass das Schweizer Wasserwerk relativ groß ist³⁰. Auch wenn davon ausgegangen werden kann, dass kleinere Anlagen verhältnismäßig größere Infrastrukturen in Relation zu ihrer Fördermenge aufweisen, liefert eine Hochrechnung nach der Gesamt-Anlagenzahl tendenziell zu

³⁰ Nach Aussage eines Teilnehmers des Experten-Workshops sind in Deutschland ca. 80 % der Wasserwerke kleiner als das Referenzwerk in der Schweiz.

hohe Werte. Deshalb verwenden wir für weitere Berechnungen den niedrigeren Gesamtmaterialbestand, wie er über die Fördermenge ermittelt wurde.

Tab. 61: Materialbestand Wasserwerke in Deutschland

Baustoff	1 Anlage (Althaus et al.)		Gesamtmaterialbestand (1.000 t)	
	Menge (kg)	kg/m³	nach Anla- genzahl	nach Förder- menge
			5.000	5.127.600.000
Guss-/Roheisen	18.200	1,52E-02	149	78
Roheisen	510	4,25E-04	4	2
Messing	2	1,67E-06	0	0
Bronze	3	2,50E-06	0	0
Aluminium, Produktionsmix	11	9,17E-06	0	0
Bewehrungsstahl	81.100	6,76E-02	662	347
Stahl, niedrig-legiert	25.500	2,13E-02	208	109
Kupfer	2.750	2,29E-03	22	12
Zink	1.020	8,50E-04	8	4
Kunstgummi, Synthesekautschuk	1	8,33E-07	0	0
PVC, bulk polymerised	2.560	2,13E-03	21	11
Flachglas, beschichtet	28	2,33E-05	0	0
Ziegel	135.000	1,13E-01	1.102	577
Quarzsand	209.000	1,74E-01	1.705	893
geschäumter Vermiculit	14.400	1,20E-02	118	62
Beton	26.910.000	2,24E+01	219.586	114.986
Gesamt	27.400.085		223.585	117.081

Quelle: Eigene Berechnungen auf der Grundlage von Althaus et al. (2007)

Festzuhalten ist, dass der überwältigende Anteil des Gesamtmaterialbestandes (etwa 98 %) Beton ist.

Ermittlung der jährlichen Materialflüsse

Die Anzahl der Wasser fördernden Unternehmen nimmt seit Jahren linear ab – von 5.477 Unternehmen in 1998 auf 4.833 Unternehmen in 2007 (Destatis 2009). Jedoch war die Rückmeldung auf dem Experten-Workshop, dass in der Regel Wasserwerke nicht geschlossen werden, da eine breite Grundversorgung sichergestellt werden muss. Wenngleich es tendenziell einen leichten Rückgang gebe, da der Wasserverbrauch stetig abnimmt, so sei diese Zahl aber zu vernachlässigen.

Darüber hinaus lassen sich keine genauen Zahlen ermitteln, wie viele Werke in welcher Größe geschlossen werden. Gleiches gilt für die jährlichen Materialflüsse durch Erneuerung und Instandhaltung. Daher können die jährlichen Materialflüsse im Bereich der Wasserwerke nicht belastbar ermittelt werden.

4.1.5 Versorgungsnetz

Hauptbestandteile des Systems zur Wasserverteilung sind die Rohrleitungen, auf die auch ein Großteil der Investitionen und Wartungskosten entfallen (rund 70 % des investierten Kapitals der Wasserversorgungsunternehmen nach DVGW 2002). Die Verteilung des Trink- und Brauchwassers (sowie teilweise des Löschwassers) erfolgt über ausgedehnte Leitungsnetze, von großen Sammel- und Fernwasserleitungen bis hin zu kleinen Versorgungsleitungen. Man unterscheidet wie folgt:

- Zubringerleitungen (Transport zu den Versorgungsgebieten),
- Fernleitungen (Länge >25 km, DN >500, z.B. Schwäbische Alb, Neckareinzugsgebiet, Halle-Leipzig),
- Hauptleitungen,
- Versorgungsleitungen,
- Anschlussleitungen.

Ermittelter Gesamtmaterialbestand

Die genaue Gesamtlänge der Wasserversorgungsleitungen ist unbekannt. Wasserverbände gehen jedoch von 500.000 km ohne Anschlussleitungen aus³¹ (ATT et al. 2008; E-Mail BDEW). Desgleichen gibt es keine Daten zur Nennweitenverteilung des Rohrnetzes in Deutschland. Aufbauend auf der Größenverteilung der Mittelstadt Rastatt (aus Klinger 2007; 47.500 Einwohner, Rohrnetz 193,8 km in 2001 inkl. Anschlussleitungen) und Beispieldaten einiger Wasserversorger wird die Nennweitenverteilung wie folgt geschätzt³²:

Tab. 62: Größenverteilung Leitungsnetz in Deutschland (geschätzt)

durchschnittliche Nennweite DN	Anteil Gesamtnetz	Länge (km)
DN 100	50 %	250.000
DN 150	30 %	150.000
DN 200	10 %	50.000
DN 400	8 %	40.000
DN 800	2 %	10.000
Gesamt	100 %	500.000

Quelle: Schätzungen auf der Grundlage von Klinger (2007), Daten des LfU Bayern und des Oldenburgisch-Ostfriesischen Wasserverbandes, Aussagen auf dem Experten-Workshop

In der Trinkwasserversorgung werden, ähnlich dem Kanalnetz (s.u.), eine Vielzahl unterschiedlicher Werkstoffe eingesetzt: Stahl, Kunststoffe, Gusseisen, Zementmörtel

³¹ Wie bereits im Kapitel Systemgrenzen erwähnt, umfasst die vorliegende Betrachtung lediglich die öffentliche Infrastruktur. Die privaten Leitungsnetze sind um einiges länger.

(zur Auskleidung metallischer Rohre als Korrosionsschutz). Insgesamt richtet sich die Auswahl geeigneter Materialien für das Trinkwassernetz nach der novellierten Trinkwasserverordnung in der Umsetzung der EG-Trinkwasserrichtlinie (Tietz 2006).

Im Bestand dominieren Gusseisenleitungen und Kunststoffleitungen. Die Schadenstatistik Wasser der DVGW gibt für 1999 folgende Werkstoffverteilung an:

Tab. 63: Materialverteilung Leitungsnetz 1999 (größenunabhängig)

Material	Anteil
Grauguss GG	30,7 %
Duktilguss GGG	26,2 %
Stahl St	7,2 %
PE	6,4 %
PVC	20,4 %
Faserzement FZ	8,9 %
Spannbeton SB	0,2 %
	100,0 %

Quelle: DVGW (2002), Schadenstatistik Wasser; Datengrundlage: 128.444 km, ohne Anschluss- und Fernleitungen

Dabei ist zu beachten, dass Grauguss-, Faserzement- und Betonrohre für die Wasserversorgung nicht mehr eingesetzt und sukzessive ersetzt werden – ein sinkender Anteil für diese Werkstoffe ist das Resultat. Der Anteil der Kunststoffrohre am Trinkwassernetz steigt insgesamt (Markus et al. 1996), mit einem steigenden Anteil von PE-Rohren im Vergleich zu PVC-Rohren (LfU 2009).

Verschiedene Werkstoffe werden vorzugsweise für bestimmte Nennweiten eingesetzt: So dominieren Kunststoffe im Versorgungsnetz mit kleinen Rohrdurchmessern, wohingegen Stahl- und Betonrohre fast ausschließlich in großen Nennweiten (ab DN 500) verwendet werden (BGW 1993; Mutschmann/Stimmelmayer 2007; KRV 2002; Merkl 2008).

Auf der Grundlage dieser Überlegungen wurden die Werkstoffe nach Nennweite geschätzt.³³ Aus Herstellerangaben lassen sich die spezifischen Rohrgewichte der verschiedenen Materialien und Rohrgrößen ermitteln. Neben den reinen Rohrmaterialien geht der Korrosionsschutz bei Guss- und Stahlrohren in die Materialbilanz ein. Duktile Gusseisenrohre werden in der Regel mit Zementmörtel ausgekleidet und mit einem Zink-Überzug versehen. Stahlrohre haben werkseitig eine Zementmörtelauskleidung und eine PE-Umhüllung.

³² Aufbauend auf den Anmerkungen aus dem Experten-Workshop wurde die Größenverteilung im Vergleich zu vorherigen Arbeitsberichten leicht modifiziert, um eine bessere Repräsentativität auch für den städtischen Raum zu erzielen.

³³ Die entsprechende Tabelle ist in der beigegefügteten Excel-Datei. Hier wurden die Anmerkungen der Experten nach dem Experten-Workshop berücksichtigt.

Zum Rohrnetz gehören auch die zahlreichen Armaturen, von denen die Absperrvorrichtungen³⁴ die wichtigsten sind (Mutschmann/Stimmelmayer 2007, 517). Die Gehäuse von Armaturen bestehen meist aus Gusseisen. Teile der Armaturen sind aus Stahl, legiertem Stahl, Buntmetallen, Kunststoffen und Dichtungsstoffen. Darüber hinaus war früher ein innerer und äußerer Bitumenüberzug als Korrosionsschutz üblich. Heute kommen verschiedene Verfahren wie z.B. elektrolytische Kunststoffbeschichtung oder Emaillierung in Betracht. Bei kleinen Nennweiten in Haupt- und Versorgungsleitungen (bis DN 300) dominieren weich dichtende Keilschieber, bei größeren Nennweiten und in Zubringer- und Fernleitungen kommen aus technisch-wirtschaftlichen Gründen und zunehmend vorwiegend Absperrklappen zum Einsatz (DVGW 2004; Mutschmann / Stimmelmayer 2007; Merkl 2008).

Folgende Annahmen werden getroffen (basierend auf DVGW 2004; Merkl 2008): Bis DN 250 sind in Abständen von 500 m Keilschieber angebracht, ab DN 400 kommen auf 50.000 km Leitungsnetz 20.000 Absperrklappen. Hydranten werden etwa alle 150 m im Haupt- und Versorgungsnetz angebracht, fast ausschließlich in Form von Unterflurhydranten. Ausgehend von 6 Hydranten / km Leitungsnetz ergibt sich eine Gesamtzahl von drei Millionen Hydranten. Unter Heranziehung spezifischer Herstellerangaben wurde folgender Materialbestand (Gusseisen³⁵) für Armaturen ermittelt:

Tab. 64: Materialbestand Armaturen im Leitungsnetz

	Anzahl	kg/ St.	Gesamt (t)
Keilschieber DN 100	500.000	24,5	12.250
Keilschieber DB 150	300.000	40,5	12.150
Keilschieber DN 200	100.000	64	6.400
Absperrklappe DN 400	16.000	130	2.080
Absperrklappe DN 800	4.000	620	2.480
Unterflurhydrant DN 80	3.000.000	36	108.000
			143.360

Quelle: Eigene Berechnungen

Zum Schutz der Rohrleitung wird in der Regel das Wasserrohr in ein Sandbett verlegt, um Schäden zu vermeiden. Dafür wird der Rohrgrabenbereich von der Grabensohle bis 30 cm über den Rohrscheitel mit geeignetem verdichtungsfähigem steinfreiem Material nach DVGW 440-2 verfüllt. Die Rohrgrabenbreite beträgt in der Regel 30 bis 60 cm (Mutschmann/Stimmelmayer 2007; Merkl 2008). Für die Ermittlung der Sandbettung wurde für jede durchschnittliche Rohrgröße jeweils das Volumen Sand für 1m Länge Rohrnetz abgeschätzt und auf das Gesamtnetz hochgerechnet:

³⁴ Absperrarmaturen sind für den Einsatz in den Schaltstellungen „geschlossen“ oder „vollständig offen“ bestimmt, wohingegen mit Regelarmaturen der Durchfluss geregelt werden kann.

³⁵ Weitere Materialfraktionen werden aufgrund ihrer geringen Massenanteile und mangelnder Daten vernachlässigt

Tab. 65: Materialbestand Sandbettung im Leitungsnetz

DN	Länge (km)	d	b	h	r	V (m³)	Menge (kg/m)	Gesamt (1.000t)
DN 100	250.000	0,1	0,5	0,5	0,1	0,24	484	121.073
DN 150	150.000	0,15	0,55	0,55	0,1	0,28	570	85.449
DN 200	50.000	0,2	0,6	0,6	0,1	0,33	657	32.858
DN 400	40.000	0,4	0,8	0,8	0,2	0,51	1.029	41.147
DN 800	10.000	0,8	1,5	1,2	0,4	1,30	2.595	25.947
Gesamt	500.000							306.474

Quelle: Eigene Berechnungen; d= Rohrdurchmesser, b= Breite Rohrgraben, h= Höhe Sandbettung, r= Radius Rohr

Insgesamt ergibt sich damit ein Materialbestand im gesamtdeutschen Leitungsnetz wie folgt:

Tab. 66: Materialbestand Leitungsnetz in Deutschland

Nennweite	DN 100	DN 150	DN 200	DN 400	DN 800	Gesamt
Leitungsnetzlänge (km)	250.000	150.000	50.000	40.000	10.000	500.000
Material (1.000t)						
Grauguss GG	1.326	930	435	876		3.567
Duktiles Gusseisen GGG	1.193	1.047	490	985	710	4.568
Zink-Überzug	3	2	1	2	1	9
Stahl St	0	222	146	404	863	1.635
PE-Umhüllung	0	8	5	13	24	50
Zementmörtel	96	132	75	172	213	688
PE-HD	54	78	27	84	0	243
PVC-U	233	167	55	174	0	630
Faserzement FZ	0	275	286	545	0	1.106
Spannbeton SB	0	0	0	0	653	653
Sand	121.073	85.449	32.858	41.147	25.947	306.474
Gesamt	123.978	88.311	34.378	44.401	28.410	319.622

Quelle: Eigene Berechnungen auf der Grundlage von Klinger (2007), KRV (2002), DVGW (2002), Mutschmann/Stimmelmayer (2007), Hillenbrand (2009), diverse Herstellerangaben inkl. Armaturen und Sandbettung, 50 % der Leitungen aus Grauguss und Stahl mit innerer und äußerer Beschichtung

Das Wasserversorgungsnetz bindet somit im eigentlichen Rohrnetz nur eine vergleichsweise kleine Menge an Ressourcen. Jedoch ist durch die Rohrbettung in Sand der Materialbestand mit über 300 Millionen Tonnen im Vergleich zu den anderen Wasser-Infrastruktursystemen überdurchschnittlich hoch. Interessant ist darüber hinaus der im Vergleich zu anderen Infrastruktursystemen hohe Anteil an Metallen im Leitungsnetz.

Neubau / Rückbau

Mit einem Anschlussgrad von 99,1 % der Bevölkerung an die öffentliche Trinkwasserversorgung (ATT et al. 2008) ist eine Erweiterung und somit der Neubau von Trinkwasserleitungen nur noch in begrenzten Maßen zu erwarten.

Aufgrund fehlender Daten muss die jährliche Zunahme der Länge des Leitungsnetzes geschätzt werden. Mit einer Erweiterungsrate von 0,5 % (= 2.500 km) liegt die Erweiterung des Leitungsnetzes unter der der Kanalisation mit ihrem geringeren Anschlussgrad. Da hauptsächlich neue Leitungen zur Erschließung von Wohngebieten gelegt werden, wird eine angepasste (kleiner dimensionierte) Größenverteilung angenommen. Des Weiteren werden aktuelle Trends der Materialwahl berücksichtigt; dabei wird insbesondere der verstärkten Nutzung von Kunststoff Rechnung getragen³⁶ (Buchert et al. 2004; KRV 2002; Frank et al. 2006). Unter Anwendung der spezifischen Rohrgewichte nach Herstellerangaben (wie im Bestand) ergibt sich folgende jährliche durchschnittliche Zunahme im Materialbestand:

Tab. 67: Jährlicher Materialbedarf im Leitungsnetz durch Neubau

Nennweite	DN100	DN150	DN200	DN400	Gesamt
Länge Anteil	70 %	20 %	8 %	2 %	
Länge (km)	1.750	500	200	50	2.500
Material (1.000t)					
Gusseisen GGG	8	3	2	0	13
Zink	0	0	0	0	0
Stahl St	1	1	2	3	6
PE-Umhüllung	0	0	0	0	0
Zementmörtel	2	1	1	1	5
PE-HD	3	1	1	0	5
Sand	848	285	131	51	1.315
Gesamt	861	292	137	55	1.344

Quelle: Eigene Berechnungen auf der Grundlage von KRV (2002), Herstellerangaben, Stein (2004), Hiltenbrand (2009)
inkl. Armaturen; 2 % Materialaufschlag für Überlappungen; 100 % innere und äußere Beschichtung auf Eisen- und Stahlrohre

Die jährliche Zunahme des Leitungsnetzes durch Erweiterung wird fast ausschließlich durch die Neuverlegung der Rohrbettung bestimmt. Daneben werden noch jährlich kleinere Mengen (ca. 13.000 Tonnen) Gusseisen verbaut.

³⁶ Nach Buchert et al. 2004 liegt der Kunststoffanteil beim Bau neuer Wasserleitungen derzeit bei etwa 30 %.

Jährliche Materialflüsse durch Erneuerung und Instandhaltung

Trinkwasser- und Abwassernetze haben eine Lebensdauer von bis zu 100 Jahren. Daher sind die kontinuierliche Instandhaltung und Erneuerung der Netze eine Daueraufgabe. Bei der Rohrsanierung unterscheidet man grundsätzlich zwischen der Erneuerung (Austausch) der Rohrleitung und der Sanierung einer bestehenden Rohrleitung. Bei der Sanierung wiederum unterscheidet man zwischen Zementmörtelauskleidung und Reliningverfahren. Aufgrund der schlechten Datenlage und vernachlässigbarer Mengen werden letztere Verfahren im Folgenden nicht berücksichtigt.

Netzerneuerungsraten müssen vor dem Hintergrund der jeweiligen individuellen Voraussetzungen wie Rohrnetzmaterial, Netzalter, Schadensraten, Leckagen bewertet werden. Ergebnisse aus einzelnen Trinkwasser-Benchmarkingprojekten zeigen Netzerneuerungsraten differenziert nach Unternehmensgröße von 0,40 bis 0,98 % (Hessen) und 0,43 bis 1,28 % (Bayern). Insgesamt werden jährlich über 2 Mrd. € im Bereich der Trinkwasserversorgung investiert, davon der Großteil in die Netze (ATT et al. 2008, 50). In Anlehnung an Tietz (2006: 241) wird eine durchschnittliche tatsächliche Netzerneuerungsrate von 0,91 % angenommen (= 4.500 km Erneuerung jährlich)³⁷. Dabei wird die Materialverteilung im Neubau auf die Größenverteilung im Bestand angewendet.

Damit ergibt sich eine jährliche durchschnittliche Zunahme durch Netzerneuerung von knapp 100.000 Tonnen (Tab. 68). Der vergleichsweise hohe Materialaufwand für die Erneuerung (ohne Rohrbettung) ergibt sich daraus, dass diese gleichmäßig über alle Dimensionen erfolgt, wohingegen der Neubau vorwiegend in kleineren (leichteren) Dimensionen erfolgt.

Tab. 68: Jährlicher Materialinput Leitungsnetz durch Netzerneuerung

Nennweite	DN100	DN150	DN200	DN400	DN800	Gesamt
Länge (km)	1800	1575	675	360	90	4.500
Material (1.000t)						
Gusseisen GGG	8	10	6	0	0	24
Zink	0	0	0	0	0	0
Stahl St	1	4	7	18	13	42
PE-Umhüllung	0	0	0	1	1	3
Zementmörtel	2	3	4	8	5	22
PE-HD	3	5	2	0	0	9
Gesamt	13	22	19	27	18	99

Quelle: Eigene Berechnungen

Materialverteilung wie Neubau, Größenverteilung wie Bestand

2 % Materialaufschlag für Überlappungen; 100 % innere und äußere Beschichtung auf Eisen- und Stahlrohre

³⁷ Der Erneuerungsbedarf liegt dagegen bei ca. 2 % und variiert in Abhängigkeit vom Rohrmaterial (Röscher 2000). Damit ergäbe sich ein jährlicher Materialinput durch Netzerneuerung von rund 220.000 Tonnen.

Analog ergibt sich ein Materialabgang von knapp 130.000 Tonnen jährlich durch die Leitungserneuerung (Tab. 69).

Tab. 69: Jährlicher Materialoutput Leitungsnetz durch Netzerneuerung

Nennweite	DN 100	DN 150	DN 200	DN 400	DN 800	Gesamt
Leitungsnetzlänge (km)	1.800	1.575	675	360	90	4.500
Material (1.000t)						
Grauguss GG	13	10	6	8		37
Duktiles Gusseisen GGG	10	11	7	9	6	43
Zink-Überzug	0	0	0	0	0	0
Stahl St	0	2	2	4	8	16
PE-Umhüllung	0	0	0	0	0	0
Zementmörtel	1	1	1	2	2	7
PE-HD	0	1	0	1	0	2
PVC-U	1	2	1	2	0	5
Faserzement FZ	0	3	4	5	0	12
Spannbeton SB	0	0	0	0	6	6
Gesamt	26	30	21	29	22	128

Quelle: Eigene Berechnungen

Material- und Größenverteilung wie im Bestand, 2 % Materialaufschlag für Überlappungen; 50 % innere und äußere Beschichtung auf Eisen- und Stahlrohre

4.1.6 Trinkwasserspeicher

Bei nahezu jeder Wasserversorgungs-Anlage ist eine Komponente zur Speicherung von Wasser erforderlich. Hierfür werden im Durchschnitt ca. 5-10 % der Gesamtkosten investiert, in Abhängigkeit von der Größe der Wasserversorgungs-Anlage (Mutschmann/Stimmelmayer 2007: 375). Man unterscheidet Hochbehälter, Wassertürme und Tiefbehälter, an die Pumpstationen angeschlossen sind. Sie werden meist als ganz oder teilweise unterirdische oder oberirdische Bauten konzipiert (DVGW 2005).

Der „typische“ Trinkwasserspeicher besteht aus zwei oder mehr Kammern, die zusammen das notwendige Behältervolumen ergeben. Dabei werden mehrere Behälterformen nach ihrem Grundriss (rechteckig, kreisförmig, vieleckig) unterschieden. Steuerung und Kontrolle des Speichers erfolgt durch ein direkt angegliedertes Bedienungshaus. Je nach Bauverfahren wird unterschieden in (i) Ort betonbehälter, (ii) Fertigteilbehälter und (iii) Fertigbehälter. Die Standardausrüstung umfasst mindestens zwei baugleiche Wasserkammern (rund oder rechteckig) und ein Bedienungshaus³⁸. Pro Wasserkammer gibt es einen Zulauf, eine Entnahme, einen Überlauf sowie die Entleerung mit den notwendigen Armaturen, ggf. ergänzt um Durchflussmesser und Wasserstandsmesseinrichtungen (DVGW 2005).

³⁸ Bei Kleinbehältern unter 100 m³ als Bedienungsschacht

Ermittelter Gesamtmaterialbestand

Die Datenlage im Bereich Trinkwasserspeicher ist in Deutschland relativ schlecht. Die vorliegenden Berechnungen basieren größtenteils auf Ergebnissen aus Benchmarking-Projekten in Bayern (LfU Bayern 2009b), welche angepasst wurden. Auf gesamtdeutscher Ebene gibt es lediglich Angaben zur Gesamtanzahl und –speichermenge, datierend von 1996 (BEW 1996, tel. Aussage Hr. Herkner / BDEW).

Insgesamt gibt es in Deutschland etwa 10.000 Wasserspeicher mit einem Gesamtvolumen von insgesamt 17.000.000 m³ (LfU Bayern 2009³⁹; Wilderer / Merkl 2001). In Bayern alleine werden laut Bayerischem Landesamt für Umwelt mehr als 2.400 Wasserspeicher (inklusive Wassertürme) mit einem Gesamtvolumen von über 2,5 Mio. m³ für die Trinkwasserversorgung genutzt. Dort dominieren klar die erdüberdeckten und teilweise eingeebneten Wasserspeicher (82 + 15 %). Freistehende Behälter und Wassertürme sind von untergeordneter Bedeutung (1 bzw. 2 %). 60 % der Wasserkammern der bayerischen Trinkwasserspeicher haben ein Volumen von bis zu 500 m³ und sind somit sehr klein. Die Gesamt-Zahl an Wassertürmen ist nicht bekannt, jedoch ist sie sehr gering (in Bayern nach Angaben des Landesamtes für Umwelt lediglich 2 %, Schulze (1998) geht von 6 % Wassertürmen aus). Darüber hinaus werden bei Neubau vorwiegend Hochbehälter gebaut, so dass der Anteil der Wassertürme weiter sinkt. Entsprechend basiert unsere Hochrechnung auf deutschlandweit 98 % ebenerdigen Wasserspeichern (Hoch- oder Tiefbehälter). Wassertürme werden nicht betrachtet.

Wasserbehälter werden fast ausschließlich aus Stahlbeton in Ortbeton gebaut (Mutschmann/Stimmelmayer 2007). Runde Behälter werden aufgrund ihrer Statik auch häufig aus Spannbeton gebaut. Auch Stahl, glasfaserverstärkter Kunststoff (GFK) oder anderes geeignetes Material darf verwendet werden (Merkl 2004). Auf Grundlage der bayerischen Daten basieren unsere Berechnungen auf einer Materialverteilung von 96 % Beton und 4 % Edelstahl. Die Zementinnenbekleidung in Betonbehältern wird für den Bestand vernachlässigt. Darüber hinaus wird unterstellt, dass Edelstahlbehälter lediglich bis zu einem Speichervolumen von 1.000 m³ Verwendung finden.

Da auf Bayern 25 % der gesamtdeutschen Wasserspeicher, jedoch nur 15 % der gesamten gespeicherten Wassermenge (2,5 von 17 Millionen m³) entfallen, muss bzgl. der Größenverteilung für Gesamtdeutschland von einer Verschiebung zugunsten größerer Behältergrößen ausgegangen werden (Tab. 70).

Tab. 70: Größenverteilung Wasserspeicher in Deutschland (geschätzt)

Größe der Wasserspeicher in m³	Bayern	Deutschland	Anzahl	Durchschnittsgröße
0-500	33 %	30 %	2.940	250
>500-1.000	27 %	24 %	2.352	750
>1.000-4.000	31 %	28 %	2.744	2.500
>4.000-10.000	6 %	13 %	1.274	7.000
> 10.000	3 %	5 %	490	20.000
	100 %	100 %		

Quelle: Eigene Berechnungen auf der Grundlage von LfU Bayern (2009b)

Über Massenbeispiele lassen sich spezifische Beton- und Stahlmassen je m³ Speichervolumen ermitteln. Mit zunehmender Speichergröße nehmen bei Betonbehältern die verbauten Betonmengen potenziell ab. Für Stahl wird für alle Größen ein Materialeinsatz von 0,06 t/m³ geschätzt. Vereinfachend wird unterstellt, dass der Materialeinsatz unabhängig von der Behälterform (rund oder eckig) ist. Edelstahlspeicher werden auf der Grundlage von Massenbeispielen auf ein Gewicht von 14 Tonnen Edelstahl für 500 m³ Wasserspeicher geschätzt. Die Bedienungshäuser werden hier unterschlagen, da sie sich in der Ausführung sehr unterscheiden (teilweise Holzbauweise).

Die ermittelten spezifischen Massen wurden für die verschiedenen Größenklassen hochgerechnet:

Tab. 71: Materialbestand Wasserspeicher in Deutschland

Größenklasse	m³	0-500	>500 - 1.000	> 1.000 - 4.000	> 4.000 - 10.000	> 10.000	Gesamt
durchschn. Volumen	m³	250	750	2.500	7.000	20.000	
Anzahl		2.940	2.352	2.744	1.274	490	9.800
Beton / Speicherraum	m³/m³	0,75	0,58	0,44	0,35	0,27	
Beton	1.000 t	1.097	2.362	6.968	7.154	6.180	23.761
Stahl	1.000 t	44	106	412	535	588	1.685
Edelstahl	1.000 t	5					5
Gesamt	1.000 t	1.147	2.467	7.380	7.689	6.768	25.451

Quelle und Anmerkungen: Eigene Berechnungen auf der Grundlage von LfU Bayern (2009b) und Herstellerangaben; Stahl nicht spezifiziert

Insgesamt ergibt sich somit ein Materialbestand für Wasserspeicher in Deutschland von rund 25 Millionen Tonnen – zum überwiegenden Teil Beton. Der Stahl setzt sich zusammen aus Betonstahl und Edelstahl für die Armaturen. Hier fehlen jedoch für eine differenzierte Betrachtung Beispieldaten. Desgleichen werden an Tiefbehälter angeschlossene Pumpstationen aus der Betrachtung ausgeklammert, da Tiefbehälter nur in Ausnahmefällen gebaut werden und aussagekräftige Daten fehlen.

Ermittlung der jährlichen Materialflüsse

Neubau / Rückbau

Im Neubau-Bereich dominieren kleine Speicher im ländlichen Raum. Diese sind häufig aus neuen Materialien (GFK, Edelstahl, PE) gefertigt. Dabei spielt auch die zunehmende Bedeutung von Löschwasserspeichern vor allem in kleineren Gemeinden eine Rolle (Hahmann/Becher 2008, tel. Auskunft Ingenieurbüro Osterhammel). Aufgrund fehlender Daten beruhen die Berechnungen auf folgenden Annahmen:

- Die Neubaurate wird auf 0,5 % geschätzt⁴⁰.
- Die Größenverteilung wird angepasst (vorwiegend kleinere Wasserspeicher).
- Die Materialverteilung wird angepasst: 50 % der Wasserspeicher bis 500 m³ sind aus Edelstahl, 30 % der Wasserspeicher bis 500 m³ sind aus GFK gefertigt.
- Die Massenbeispiele für Edelstahl und GFK beruhen auf Herstellerangaben: 500 m³ Edelstahltank à 14 Tonnen; 250 m³ GFK-Tank à 8 Tonnen.
- Beton- und Stahlkoeffizienten werden aus der Bestandsrechnung übernommen: Stahl 0,06 t/m³ Speicherraum, Betonanteil sinkt mit zunehmender Größe.

Tab. 72: Jährlicher Materialbedarf Trinkwasserspeicher durch Neubau

Größenklasse	m ³	0-500	>500 - 1.000	> 1.000 - 4.000	> 4.000 - 10.000	> 10.000	Gesamt
durchschn. Speichervolumen	m ³	250	750	2.500	7.000	20.000	
Größenverteilung		50 %	20 %	20 %	8 %	2 %	
Anzahl		25	10	10	4	1	50
Beton / Speicherraum	m ³ /m ³	0,75	0,58	0,44	0,35	0,27	
Beton	1.000 t	2,2	10	25,4	22,5	12,6	72,7
Stahl	1.000 t	0,4	0,5	1,5	1,7	1,2	5,2
Edelstahl	1.000 t	0,2					0,2
Kunststoff (GFK)	1.000 t	0,06					0,06
Gesamt	1.000 t	2,8	10,5	26,9	24,1	13,8	78,1

Quelle: Eigene Berechnungen

Sanierung

Grundsätzlich besteht für Wasserspeicher ein hoher Pflege- und Reinigungsaufwand, insbesondere auf den benetzten Flächen. Es gibt verschiedene Möglichkeiten zur Sanierung der Behälter, um die Dichtheit und Oberflächenstruktur der Wasserkammern (Wände und Sohle) wiederherzustellen: beschichten, verputzen, auskleiden. In den

⁴⁰ Die Neubaurate ist in Anlehnung an die Erweiterung des Versorgungsnetzes geschätzt und somit nicht durch Quellen gestützt.

meisten Fällen wird eine Zementmörtelbeschichtung auf die Flächen der Wasserkammer aufgetragen. Ein Ersatzneubau wird selten vorgenommen. Folgende Annahmen werden getroffen:

- Die Sanierung von Wasserspeichern (Beton) erfolgt durch das Auftragen einer Zementmörtelbeschichtung.
- Basierend auf der durchschnittlichen Lebensdauer von Betonbauwerken von 30 bis 40 Jahren (tel. Auskunft Herr Roth / Ingenieurbüro Osterhammel) wird eine jährliche Sanierungsrate von 2,5 % zugrunde gelegt.
- Auf der Grundlage von Sanierungsbeispielen wird geschätzt, dass die zu sanierende Fläche jeweils der Hälfte des Speichervolumen-Wertes entspricht.
- Es wird eine Mindestdicke von 10 mm empfohlen (Gerdes/Wittmann 2003). In der Praxis sind Beschichtungen häufig dicker (z.B. Firma Vandex). Den Berechnungen hier liegt eine Beschichtungsdicke von 15 mm zugrunde. Damit ergibt sich eine Masse von 30 kg Zementmörtel / m².

Tab. 73: Jährliche Materialzunahme Trinkwasserspeicher durch Sanierung

Größenklasse	m ³	0-500	>500 - 1.000	> 1.000 - 4.000	> 4.000 - 10.000	> 10.000	Gesamt
durchschn. Speichervolumen	m ³	250	750	2.500	7.000	20.000	
Anzahl		64	59	69	32	12	235
Zementmörtel	1.000 t	0,2	0,7	2,6	3,3	3,7	10,5

Quelle: Eigene Berechnungen

Auf Grundlage der getroffenen Annahmen ergibt sich somit für Trinkwasserspeicher ein recht geringer jährlicher Input von insgesamt knapp 90.000 Tonnen, unterschieden in Neubau (knapp 80.000 Tonnen, s. Tab. 72) und Sanierung (Zementmörtelbeschichtung, rund 10.000 Tonnen jährlich, s. Tab. 73). Der Neubau von kleinen Trinkwasserspeichern neuer Materialien (Edelstahl, GFK) fällt dabei so gut wie gar nicht ins Gewicht: Nach wie vor dominieren mineralische Baustoffe in dem Bereich.

4.1.7 Pumpwerke

Kann Wasser nicht mit natürlichem Gefälle der Verwendungsstelle zufließen, so muss es mittels „Wasserförderanlagen“ so weiter transportiert werden, dass es im gesamten Versorgungsgebiet mit ausreichendem Druck und in ausreichender Menge zur Verfügung steht. Man unterscheidet Hauptpumpwerke, Zwischenpumpwerke und Druckerhöhungsanlagen (Mutschmann/Stimmelmayer 2007). Pumpwerke bestehen in der Regel aus mehreren Räumen mit mehreren Pumpen, den dazugehörigen Antrieben und allen zum Betrieb erforderlichen Nebeneinrichtungen (hydraulische Einrichtungen, Energieversorgung etc.).

Der Regelfall in der Trinkwasserversorgung sind Kreiselpumpen, welche nach dem Fliehkraftprinzip arbeiten (Merkl 2008). In Pumpwerken sind Kreiselpumpen mit liegender Welle üblich, in gleicher Flucht aufgestellt mit dem angekuppelten Elektromotor. Kreiselpumpen werden kostengünstig und serienmäßig erstellt. Die Bauarten von Kreiselpumpen werden nach Stufenzahl, Wellenlage und Zahl der Laufradströme (ein- oder zweiflutig) unterschieden (Mutschmann/Stimmelmayer 2007). Neben den Elektromotoren werden meist noch Dieselmotoren als Notstromaggregate in Pumpwerken vorgehalten, um bei Netzstromausfall den geregelten Pumpenbetrieb aufrechtzuerhalten. Des Weiteren gibt es in Pumpwerken zur Energieverteilung Schaltgeräte, Leitungen und Transformatoren (Mutschmann/Stimmelmayer 2007) sowie umfangreiche Mess- und Anzeigeinstrumente.

Aufgrund der Heterogenität und der nicht ausreichenden Datenbasis (über die Gesamtzahl an Pumpwerken in Deutschland liegen keine Angaben vor) haben wir von einer weiteren Bearbeitung der Pumpwerke im Rahmen der vorliegenden Studie abgesehen.

4.2 Materialbestände und –flüsse der Infrastrukturen der Abwasserentsorgung

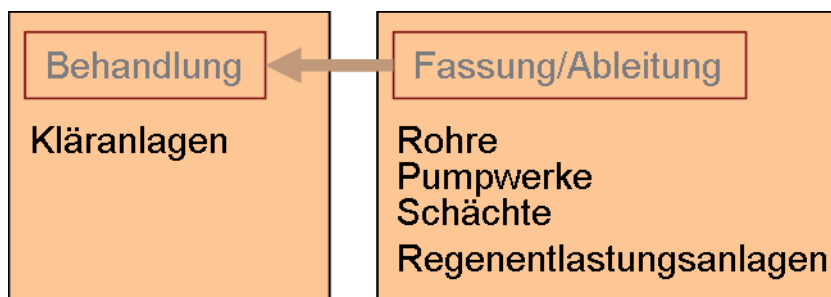
Die öffentliche Abwasserentsorgung in Deutschland ist eine hoheitliche Pflichtaufgabe, von Gemeinden und Städten in kommunaler Trägerschaft wahrgenommen. Die Durchführung der Abwasserentsorgung kann durch den Träger der Abwasserentsorgungsaufgabe selbst gewährleistet oder auf Dritte übertragen werden. Mit mehr als 6.900 vorwiegend öffentlich-rechtlichen Abwasserbeseitigungsbetrieben (Destatis 2009) ist die Abwasserwirtschaft in Deutschland sehr kleinteilig organisiert.

Mitte des 19. Jahrhunderts begann Deutschland mit der Einführung einer geordneten Wasserversorgung und Abwasserentsorgung in größeren Städten, motiviert durch katastrophale hygienische Bedingungen. Mittlerweile ist die kommunale Abwasserentsorgung Deutschlands im europäischen Vergleich führend (BMU 2006). 1991 waren 90 % der Bevölkerung, im Jahr 2007 96 % direkt an die öffentliche Kanalisation angeschlossen (Destatis 2009). Der Anschlussgrad an öffentliche Abwassersysteme hat damit die Grenze des ökonomisch Sinnvollen erreicht (BMU 2006). Der nicht angeschlossene Teil der Bevölkerung lebt überwiegend in geografisch abgelegenen Gebieten und entsorgt sein Abwasser über dezentrale (Klein-)Anlagen oder Fäkalienabfuhr.

Die Abwassernetze in den städtischen Regionen bedürfen mittlerweile großer Sanierungs- und Instandhaltungsmaßnahmen. Darüber hinaus führen geänderte Rahmenbedingungen (demographischer Wandel, Klimawandel) zu modifizierten Anforderungen an die Netze und Kläranlagen, welche sich diesen anpassen müssen.

Zur Sicherstellung einer flächendeckenden Abwasserentsorgung ist eine aufwändige Infrastruktur mit hohen Erschließungskosten erforderlich. Vielfältige technische Anlagen zur Abwassersammlung, -ableitung und -behandlung sind notwendig. Den einzelnen Prozessschritten in der Wasserversorgung lassen sich folgende Anlagen zuordnen:

Abb. 6: Anlagen der Wasserentsorgung



Quelle: Eigene Darstellung

Nach einer kurzen Einführung in den jeweiligen Infrastrukturtyp werden die jeweiligen Materialbestände und –flüsse detailliert hergeleitet.

4.2.1 Kanalisation

Die Abwassersammlung und der Transport erfolgen im Kanalnetz. Darunter fallen sämtliche Anlagen zur Sammlung und Ableitung von Niederschlagswasser und Abwasser, d.h. Kanäle, Abwasserdruckleitungen und zugehörige Bauwerke⁴¹ in einem Entwässerungsgebiet (öffentlicher Zuständigkeitsbereich) nach DIN 4045. Die Anschlusskanäle, d.h. die Kanäle zwischen dem öffentlichen Abwasserkanal und der Grundstücksgrenze bzw. der ersten Reinigungsöffnung auf dem Grundstück, gehören gemäß dem Deutschen Normenwerk ebenfalls zum öffentlichen Zuständigkeitsbereich der Kanalisation. Jedoch werden diese bspw. vom Statistischen Bundesamt nicht mit erfasst (Destatis 2009, Tabelle 7) und sind nicht Gegenstand der weiteren Berechnungen. Des Weiteren werden Abwasserdruckleitungen, welche einen geringen Anteil am Kanalnetz haben (3,8 % in NRW nach Harting 2006), vernachlässigt.

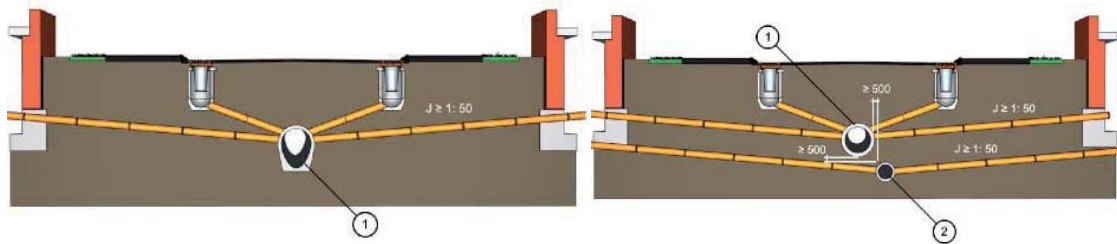
Neben dem o.g. Kanalnetz (Entwässerungsnetz) besteht die Gesamtkanalisation noch aus der Grundstücksentwässerung. Grundstücksentwässerungsleitungen liegen im privaten Zuständigkeitsbereich, der sich in Abhängigkeit von der jeweils gültigen Abwasserbeseitigungssatzung der Kommune bis zur Einbindung in den Abwasserkanal erstrecken kann. Auch Liegenschaften des Bundes u.a. Gebietskörperschaften sind Teil der Grundstücksentwässerung und somit nicht Gegenstand der vorliegenden Betrachtung (Stein 2004).

Abwasserkanäle nach DIN 4045 sind offene oder geschlossene Gerinne, in denen Abwasser i.d.R. mit freiem Gefälle abgeleitet wird. Anschlusskanäle münden in Straßenkanäle, welche zu Neben- und Hauptsammlern zusammengeführt werden. Die Hauptsammler leiten die Abwässer einer Kläranlage zu (Tietz 2006).

Man unterscheidet Mischkanalisation (Schmutzwasser und Niederschlagswasser werden gemeinsam abgeführt) und Trennkanalisation (Schmutzwasser und Niederschlagswasser werden in zwei getrennten Kanälen abgeführt) (Abb. 7).

⁴¹ Schächte und Regenentlastungsanlagen sind gesondert ausgewiesen.

Abb. 7: Misch- und Trennkanalisation



1: Mischkanal

1: Regenkanal, 2: Schmutzwasserkanal

Quelle: Stein (2004)

Durch die erheblichen Schwankungen des Regenwasserabflusses (welcher mehr als das 100-fache des Schmutzwasserabflusses betragen kann) sind die Kanäle in Mischsystemen häufig sehr groß dimensioniert. Schmutzwasserkanäle sind dagegen selten größer als DN500 (= 50 cm Durchmesser) (Stein 2004). Beim Neubau von Anlagen gibt es allerdings einen Trend zur Trennkanalisation sowie zur dezentralen Regenwasserversickerung, z.B. über Mulden-Systeme.

Darüber hinaus werden Kanäle unterschieden nach Freispiegel-, Druck- und Unterdruckleitungen. In ersteren liegt der Wasserstand im Rohr unter dem Rohrscheitel und die Kanäle sind nur in Ausnahmefällen komplett mit Abwässern gefüllt, bspw. bei starken Regenereignissen in der Misch- oder Regenwasserkanalisation (Tietz 2006). Der Abfluss erfolgt durch Schwerkraft.

Kanalgrößen

Abwasserkanäle haben im Vergleich zu Trinkwasserleitungen große Querschnitte. Hauptabwassersammler in Ballungsräumen können begeh- und tlw. sogar mit Booten befahrbar sein. Mindestnennweiten sollen die Abführung auch gröberer und sperriger Stoffe sowie ggf. die Begehmbarkeit gewährleisten. Heute gelten für Schmutzwasserkanäle Mindestweiten von DN200, für Regen- und Mischwasserkanäle jeweils DN250, es werden jedoch größere Mindestnennweiten ausdrücklich empfohlen (DN250, bzw. DN300) (Stein 2004). Die Hauptsammler, durch die das Abwasser zu den Kläranlagen geleitet wird, können auch Größen bis zu DN4000 (4 m) oder in Ausnahmefällen mehr besitzen.

In der Vergangenheit kamen Kanäle mit unterschiedlichsten Querschnittsformen und -abmessungen in Abhängigkeit vom Werkstoff, Hydraulik etc zum Einsatz und werden entsprechend teilweise noch heute verwendet. Die wichtigsten Querschnittsformen (Kanalprofile) sind der Kreis-, der normale Ei- und der normale Maulquerschnitt, genormt nach DIN 4263. Rechteckquerschnitte finden nur in Sonderfällen Verwendung. Eine Reihe weiterer Querschnittsformen werden heute noch in Einzelfällen eingesetzt (vgl. Stein 2004).

Verwendete Materialien

Ältere Kanäle bestehen meist aus Ziegeln oder Ton- bzw. Steinzeug⁴². Begehbare Kanäle wurden früher meist aus hartgebrannten Ziegeln (Backsteine, Kanalklinker) aufgemauert und seit Beginn des 20. Jahrhunderts aus Kosten- und Arbeitszeitgründen in Ortbeton hergestellt. Heute besteht der überwiegende Teil der Kanalisationen aus vorgefertigten Rohren unterschiedlicher Werkstoffe. Vorherrschend sind Beton und Stahlbeton oder Steinzeug. In jüngerer Zeit werden – je nach Größe und Belastung – Kunststoffrohre sowie Rohre aus duktilem Gusseisen, Stahl, Faserzement und Polymerbetonrohre verwendet (Stein 2004). Daten zur Materialverteilung nach Kanalnetzlänge in bestehenden Netzen und bei Neubauten sind vorhanden (Stein 2004; Berger/Lohaus 2005; Frank et al. 2006).

- *Kanalklinker*: Eiquerschnitt, häufig ältere, große Abwassersammler.
- *Steinzeug*: Ältester Kanalwerkstoff, Kreisquerschnitt, meist kleinere Nennweiten (meist DN100 bis DN600), jedoch erhältlich von DN100 bis DN1200, auch als Vortriebsrohre (für geschlossene Bauweise) erhältlich; teurer, aber längere Lebensdauer und widersteht sicher chemischen und mechanischen Anfressungen.
- *Kunststoffe*: Man unterscheidet zwischen Vollwandrohren und Systemen mit profilierter Wandung aus den Kunststoffen PVC-U, PE-HD, PVC, PE oder PP. Systeme mit profilierter Wandung können aufgrund der Profilverstärkung mit geringerer Wanddicke hergestellt werden, wodurch sich bei gleicher Rohrsteifigkeit eine wesentliche Gewichtseinsparung ergibt (Stein 2004). Tw. Einarbeiten von Glasfasern oder Stahldrähten; Kreisquerschnitt.
- *Stahl*: Spielt als Werkstoff für Freispiegelleitungen keine wesentliche Rolle, nur bei besonderen Anforderungen (vgl. Stein 2004). Innen wird der Stahl mit einem Korrosionsschutz in Form einer Plastomerbeschichtung versehen.
- *Gusseisen*: Seit 1956 werden in Deutschland Rohre aus duktilem Gusseisen⁴³ hergestellt. Ein äußerer und innerer Korrosionsschutz ist notwendig. Einsatz für Freispiegelleitungen und bevorzugt Druckleitungen sowie in (hydro-)geologisch schwierigem Gelände. Nennweiten von DN100 bis DN1400, auch in geschlossener Bauweise (DN250 bis DN400).
- *Beton*: Großtechnischer Einsatz von Betonrohren in der Kanalisation in Deutschland seit den 1880er Jahren, alle Querschnittsformen und –maße möglich, Sonderformen, teilweise integrierter Korrosionsschutz (Steinzeug, Kunststoff), teilweise Ausführung in Ortbeton (gebräuchlich bei DN>800).

⁴² Steinzeug ist die Bezeichnung für Tonrohre, die durch Brennen bei einer Temperatur von 1.200-1.300°C (je nach Zusammensetzung und Masse) verglasen (Tietz 2006: 258).

⁴³ Duktiles Gusseisen enthält im Gegensatz zu Grauguss Kugelgraphit. Die Graphitform prägt im Wesentlichen die mechanischen Eigenschaften. Im Falle von duktilem Gusseisen sind dies eine hohe Zugfestigkeit und Verformbarkeit, sowie die Möglichkeit, geschweißt zu werden (Stein 2004).

- *Stahlbeton*: Einsatz seit den 1880er Jahren, geringeres Gewicht durch relativ geringe Wanddicke, daher bereits frühe Verwendung in großen Nennweiten (bis DN2500), besondere Eignung für hohe Belastungen sowie dynamische Beanspruchung infolge Verkehrsschwankungen und geringer Scheitelüberdeckung.
- *Spannbeton*: Vorwiegend Kreisquerschnitt, Nennweiten DN500 bis DN4000 und größer, Baulängen bis 8m.

Umfrageergebnisse lassen für die nächsten 5 Jahre klare Trends bezüglich der Materialwahl erkennen: Demnach werden die Anteile von Beton und Steinzeug als weitgehend stabil eingeschätzt, wohingegen für Mauerwerk, Stahl und Guss überwiegend sinkende Anteile erwartet werden. Steigende Anteile können nach Einschätzung der Befragten vor allem Kunststoffe als Werkstoff im Abwasserbereich verzeichnen, was insbesondere von PE getragen wird (Frank et al. 2006).

Material nach Rohrgröße

Rohrwerkstoffe werden in starker Anhängigkeit vom Rohrdurchmesser eingesetzt. Wichtig sind bei der Auswahl der Werkstoffe insbesondere eine hohe Lebensdauer, Korrosionsbeständigkeit sowie Beständigkeit gegen Hochdruck-Reinigung (IKT 2006; Frank et al. 2006). Kleine und mittelgroße Leitungen werden aus Beton- oder Steinzeugrohren zusammengesetzt (Imhoff/Imhoff 2007). Bei Abwassertransportleitungen größer DN800 kommen vorwiegend Beton oder Stahlbetonrohre zum Einsatz, früher Kanalklinker (Tietz 2006).

Daten zur Werkstoffverteilung in Abhängigkeit vom Kanalquerschnitt sind von einzelnen Städten vorhanden (Stein 2004). Auf gesamtdeutscher Ebene liegen lediglich Daten zur Werkstoffverteilung differenziert in Nennweitenschritten von DN400 (Frank et al. 2006) sowie differenzierte Daten für den Neubau vor (Waniek 2008; Frank et al. 2006).

Rohreinbettung

Früher, und in Ausnahmefällen bis in die heutige Zeit, wurden Betonummantelungen (Teil- und Vollummantelung) um Abwasserkanäle großer Nennweiten vorgeschrieben, so dass ein starres Bauwerk im Baugrund errichtet wurde (Stein 2004). Alternativ werden Sand, Kies oder Beton als Rohraufleger in die Bettung verfüllt. Darüber hinaus wird der Rohrgraben in der Regel bis 30 cm über Scheitel mit Sand und feinem Kies verfüllt. Jedoch wird mittlerweile die offene Bauweise vermehrt aufgrund ökologischer Überlegungen von geschlossener Bauweise (Schildvortrieb, Rohrvortrieb) abgelöst.

Ermittelter Gesamtmaterialbestand

Das Kanalnetz in Deutschland ist vergleichsweise gut dokumentiert. Nach Angaben des Statistischen Bundesamtes beträgt die Gesamtlänge der öffentlichen Kanalisation (ohne Anschlusskanäle) in Deutschland 2007 540.723 km. Davon entfallen 239.086 km auf Mischwasserkanäle, 114.373 km auf Regenwasserkanäle und

187.264 km auf die kleiner dimensionierten (bis DN 500) Schmutzwasserkanäle (Destatis 2009, Tabelle 7).

Abwasserkanäle haben im Vergleich zu Trinkwasserleitungen größere Querschnitte mit empfohlenen Mindestnennweiten von DN250 für Schmutzwasserkanäle und DN300 für Misch- und Regenwasserkanäle (Stein 2004). Da es keine Daten zur gesamtdeutschen Größenverteilung der Kanalisation gibt, greifen wir auf die Arbeit von Reckerzügl (1997) zurück. Jeder Größenklasse wird eine durchschnittliche Nennweite in einer spezifischen Querschnittsform zugeordnet (Tab. 74).

Tab. 74: Größenverteilung und Querschnittsformen Kanalnetz (geschätzt)

Größenklasse	Anteil	Länge (km)	durchschnittliche Nennweite DN	Querschnittsformen
bis DN300	50 %	270.362	250	Kreisquerschnitt
> DN300 bis DN400	30 %	135.181	350	Kreisquerschnitt
> DN400 bis DN600	13 %	70.294	500	Kreisquerschnitt
> DN600 bis DN800	5 %	43.258	700	Beton 75% Kreis, 25% Ei, Mauerwerk 100% Ei
> DN800 bis DN1200	2 %	21.629	1000	Beton 50% Kreis, 50% Ei, Mauerwerk 100% Ei
Gesamt	100 %	540.723		

Quelle: Eigene Schätzungen auf der Grundlage von Reckerzügl (1997) und Stein (2004)

Die Materialverteilung des deutschen Kanalnetzes ist gut dokumentiert, bis hin zu Materialien nach Kanalgröße (Berger / Lohaus 2004; Frank et al. 2006). Beton und Steinzeug dominieren die Materialverteilung im deutschen Kanalnetz mit 46 % bzw. 40 %, gefolgt von Kunststoff (6 %, hauptsächlich PVC-Hart und PE-HD), Mauerwerk (3 %), Faserzement (2,5 %) und Guss bzw. Stahl (1,5 %) (Berger/Lohaus 2004). Letztere zwei Werkstoffe sind vom Bestand her vernachlässigbar und werden in den Berechnungen nicht berücksichtigt⁴⁴.

Rohrwerkstoffe werden in starker Abhängigkeit vom Rohrdurchmesser eingesetzt. Kleine Nennweiten bestehen größtenteils aus Steinzeug, Beton oder Kunststoff. Bei großen Durchmessern kommen vorwiegend Beton, früher Kanalklinker, zum Einsatz (Imhoff/Imhoff 2007; Stein 2004). Entsprechend wurden die Werkstoffe nach Nennweiten geschätzt:

⁴⁴ Da Kanäle aus Mauerwerk noch eine große Rolle in großen Nennweiten spielen, werden diese in die Berechnung einbezogen.

Tab. 75: Materialverteilung Kanalnetz nach Größe geschätzt

Nennweite	bis DN300	> DN300 bis DN400	> DN400 bis DN600	> DN600 bis DN800	> DN800	Gesamt- länge	Anteil Ge- samtnetz
Kanalnetzlänge (km)	270.362	135.181	70.294	43.258	21.629	540.723	
Material							
Beton	30 %	60 %	78 %	78 %	70 %	265.928	49,2 %
Steinzeug	60 %	36 %	20 %	5 %	5 %	228.185	42,2 %
Mauerwerk	0 %	0 %	0 %	15 %	24 %	11.680	2,2 %
Kunststoff	10 %	4 %	2 %	2 %	1 %	34.931	6,5 %
Gesamt	100 %	100 %	100 %	100 %	100 %	540.723	100,0 %

Quelle: Geschätzt auf Basis von Berger/Lohaus (2004), Frank et al. (2006)

Aus Herstellerangaben lassen sich die spezifischen Rohrgewichte der verschiedenen Materialien⁴⁵ und Rohrgrößen ermitteln. Der derzeitige Materialstock von insgesamt fast 150 Millionen Tonnen Baustoffen⁴⁶ (Tab. 76) ist entsprechend ein Resultat der über die vergangenen Jahrzehnte eingebauten Rohrmaterialien und Dimensionen.

Tab. 76: Materialbestand Kanalnetz in Deutschland 2007

Nennweite	bis DN300	> DN300 bis DN400	> DN400 bis DN600	> DN600 bis DN800	> DN800	Gesamt
Kanalnetzlänge (km)	270.362	135.181	70.294	43.258	21.629	540.723
Material (1.000t)						
Beton / Stahlbeton	9.679	24.199	22.574	28.967	27.028	112.448
Bewehrungsstahl BSt 500	248	620	579	474	277	2.199
Steinzeug	8.769	5.013	2.495	1.032	987	18.298
Kanalklinker	0	0	0	4.939	6.824	11.763
Zementmörtel	0	0	0	1.373	1.897	3.270
Kunststoff	291	148	75	20	8	543
Sand/Kies	272.207	166.621	111.578	109.456	75.035	734.897
Gesamt	291.443	197.222	137.881	146.737	112.334	883.418

Quelle: Eigene Berechnungen auf Grundlage von Reckerzügl (1997), Berger/Lohaus (2004), Frank et al. (2006), Sachverständigenbüro Fischer (2009), verschiedene Herstellerangaben für 50 % der Betonrohre im Kreisprofil wird ein Stahl-Anteil von 5 % Bewehrungsstahl angenommen. inkl. 2 % Materialaufschlag durch Überlappungen (Hillenbrand 2009)

Insgesamt dominieren im Kanalnetz die mineralischen Baustoffe mit einem überraschenden Anteil an Sand und Kies, bedingt durch die Rohrbettung. Von den Rohrmaterialien hat im Kanalnetz – im Gegensatz zum Leitungsnetz – Beton eine herausragende Rolle. Dieser resultiert hauptsächlich aus dem großen Anteil von Betonrohren größerer Dimension mit einem hohen spezifischen Rohrgewicht.

⁴⁵ Die Massenangaben zu den Kanälen aus Mauerwerk beruhen auf Schätzungen, da keine Herstellerangaben verfügbar sind.

⁴⁶ Ohne Rohrbettung

Jährliche Materialflüsse durch Neubau / Rückbau

Der Aufbau der Kanalisationen in Deutschlands begann mit der industriellen Entwicklung zu Beginn des 19. Jahrhunderts in den großen Städten und wurde in den letzten Jahrzehnten fortlaufend erweitert. Seit 1842 werden in Deutschland planmäßig Kanalisationen errichtet und stellen heute große Vermögensanlagen von Kommunen dar (Stein 2004). Mittlerweile steht jedoch die Instandhaltung und Erneuerung im Vordergrund. Alte, brüchige Kanäle sind potenzielle Emissionsquellen von umweltgefährdenden Flüssigkeiten und müssen entsprechend sorgfältig überwacht und ggf. saniert werden.

Durchschnittlich wuchs die Kanalisation in Deutschland in den letzten neun Jahren um 10.530 km jährlich (Bruttozunahme, Destatis 2009, Tab.7), das entspricht einer Zuwachsrate von knapp 2 %.

Folgende Annahmen werden hinsichtlich der Netz-Erweiterung getroffen:

- Die Größenverteilung im Neubau ist gleich der Größenverteilung im Bestand
- Die Materialverteilung spiegelt die aktuellen Präferenzen der Netzbetreiber: Es dominieren weiterhin Beton und Steinzeug, die Rolle von Kunststoff wächst und wird sich zukünftig im Stock widerspiegeln.
- Nach Angaben der IKT-Marktumfrage von 2007 werden etwa 80 % der neuen Kanäle in offener Bauweise verlegt (Waniek 2008), was Auswirkungen auf die Materialflüsse von Sand und Kies im Rahmen der Rohrbettung hat.

Damit ergibt sich ein jährlicher Zuwachs durch Neubau wie folgt:

Tab. 77: Jährlicher Materialbedarf im Kanalnetz durch Neubau in Deutschland

Nennweite	bis DN300	> DN300 bis DN400	> DN400 bis DN600	> DN600 bis DN800	> DN800	Gesamt
Kanalnetzlänge (km)	5.265	2.633	1.369	842	421	10.530
Material (1.000t)						
Beton	0	197	368	511	601	1.677
Steinzeug	126	106	36	39	19	326
Kunststoff	28	21	11	3	2	65
Stahl	7	5	5	5	0	21
...Zementmörtel	3	2	2	2	0	9
...PE	0	0	0	0	0	1
Sand/Kies	4.241	2.596	1.738	1.705	1.169	11.449
Gesamt	4.405	2.929	2.160	2.265	1.791	13.550

Quelle: Eigene Berechnungen

Durchschnittlich nimmt der Materialstock aktuell jährlich um rund 13,5 Millionen Tonnen Material zu. Da der Anschlussgrad sich einer Sättigung nähert, ist damit zu rechnen, dass diese Werte künftig sinken.

Jährliche Materialflüsse durch Erneuerung und Sanierung

Trinkwasser- und Abwassernetze haben eine Lebensdauer von bis zu 100 Jahren. Daher sind die kontinuierliche Instandhaltung und Erneuerung der Netze eine Daueraufgabe. Nach Angaben der Deutschen Wasserverbände sind ungefähr 20 % der öffentlichen Kanalisation kurz- bzw. mittelfristig sanierungsbedürftig. Weitere 21,5 % weisen geringfügige Schäden auf und müssen langfristig saniert werden (ATT et al. 2008; Berger/Lohaus 2004).

Umfragen des IKT – Institut für Unterirdische Infrastruktur zeigen, dass die jährlichen Investitionen der Netzbetreiber in ihre Kanalisation steigen: von 2005 auf 2006 um 8 %, von 2005 auf 2007 um 10 % (Waniek 2008). Dies betrifft vorrangig Sanierungen, wohingegen der Bereich Kanalneubau/-erschließung eine rückläufige Tendenz aufweist. Offenbar werden nun nach langjährig rückläufigen Investitionsraten Investitionen in die Sanierung der Kanalnetze angegangen, welche, wenngleich notwendig, häufig aus Haushaltsgründen zurückgestellt wurden (IKT 2006).

Bei der Sanierung unterscheidet man zwischen Reparatur, Renovierung und Erneuerung.⁴⁷ Erstere umfasst lediglich die Behebung örtlich begrenzter Schäden durch Ausbesserung, Injektion und Abdichtung und wird bei einem Viertel der beobachteten Kanalschäden angewendet (Tab. 78). Es ist zu berücksichtigen, dass Beton- und Steinzeugrohre häufiger Schäden aufweisen als Kunststoffrohre (Stein 2004).

Tab. 78: Anteile der unterschiedlichen Sanierungsverfahren im deutschen Kanalnetz

			2001	2004
Reparatur	Behebung örtlich begrenzter Schäden	Ausbesserung	18 %	9 %
		Injektion	7 %	7 %
		Abdichtung	5 %	9 %
Renovierung	Verbesserung der aktuellen Funktionsfähigkeit von Abwasserleitungen und –kanälen unter vollständiger oder teilweiser Einbeziehung ihrer ursprünglichen Substanz	Beschichtung	1 %	3 %
		Relining	15 %	21 %
		Montage	1 %	2 %
Erneuerung	Herstellung neuer Abwasserleitungen und –kanäle in der bisherigen oder einer anderen Linienführung, wobei die neuen Anlagen die Funktion der ursprünglichen Abwasserleitungen und –kanäle einbeziehen	Offene Bauweise	48 %	40 %
		Geschlossene Bauweise	5 %	9 %

Quelle: Berger/Lohaus (2004)

Prinzipiell lässt sich ein Trend zur Renovation und – bei der Erneuerung – zur geschlossenen Bauweise feststellen. Bei der Renovation dominiert das so genannte Relining – in den vorhandenen Kanal wird über unterschiedliche Verfahren ein neues,

⁴⁷ Einen Überblick über den aktuellen Stand der Sanierungsverfahren bietet Zesch 2009, detailliertere Informationen finden sich z.B. bei Stein 2004.

kleiner dimensioniertes Profil, in den meisten Fällen aus Kunststoff (PVC, PE, GFK, Synthesefaser), eingezogen.

Nach Angaben von Koziol et al. (2006) wäre eine „normale“ Erneuerungsrate bei 1,5 % pro Jahr anzusetzen. Zur Verringerung des Sanierungsstaus seien sogar ca. 3 % des vorhandenen Abwassernetzes zu erneuern (ebd.). Jedoch fällt die Erneuerungsrate in der Realität meist geringer aus. Die Stadtwerke Essen haben bspw. eine Netzerneuerungsrate von 1 % (Reineck 2007). Für Oslo haben Venkatesh et al. (2009) eine Netzerneuerungsrate von lediglich 0,4 % bestimmt.

Ermittelt man die sanierte Kanallänge über die tatsächlichen Investitionen der Netzbetreiber, so ergibt sich ein differenziertes Bild: Im Jahr 2003 wurden für die Sanierungsmaßnahmen durchschnittlich 20,34 € pro angeschlossenem Einwohner ausgegeben. Hochgerechnet auf das gesamte Bundesgebiet und 82,5 Mio. Bundesbürger können die Ausgaben für die Kanalsanierung in 2003 mit rund 1,6 Mrd. Euro abgeschätzt werden (ATT et al. 2008). Schätzungen für die mittleren Kosten einer Kanalsanierung schwanken zwischen 300 und 540 Euro / Meter – mit geringeren Kosten für eine Reparatur und entsprechend hohen Kosten für eine Leitungserneuerung (ATT et al. 2008, Berger/Lohaus 2004, Koziol et al. 2006). Mit zugrunde gelegten Kosten von 420 Euro / Meter sanierter Kanal betrug in 2003 die sanierte Kanallänge lediglich rund 3.800 km – das entspricht rund 0,7 % des Gesamtkanalnetzes und liegt somit deutlich unter empfohlenen Netzerneuerungsraten.

Vor diesem Hintergrund werden hinsichtlich der Kanalsanierung folgende Annahmen getroffen:

- Insgesamt wird eine jährliche Sanierungsrate von etwa 1 % zugrunde gelegt (5.000 km). Diese beinhaltet Reparatur, Renovation und Erneuerung und trägt den geschätzten geringeren tatsächlichen Investitionen Rechnung. Die höhere angenommene Sanierungsrate (im Vergleich zu 0,7 %) wird dadurch ausgeglichen, dass die Materialflüsse für Reparaturen nicht in die Gesamtbetrachtung einfließen⁴⁸.
- 20 % der zu sanierenden Kanalisation werden durch Relining renoviert, 40 % in offener und 10 % in geschlossener Bauweise erneuert⁴⁹.
- Die Größenverteilung bei der Sanierung ist gleich der Größenverteilung im Bestand (und bei Neubau).
- Das Relining erfolgt durch das Einziehen eines zusätzlichen Kunststoffschlauches unterschiedlicher Ausführung. Dabei erfolgt keine Unterscheidung hinsichtlich verschiedener Verfahren.

⁴⁸ D.h. die Berechnungen umfassen lediglich jene 3.500 km, welche durch Renovierung und Erneuerung saniert werden.

⁴⁹ 30 % der Sanierungsmaßnahmen umfassen lokale Reparaturen, welche hier nicht weiter betrachtet werden.

- Bei der offenen Erneuerung (80 %) erfolgt die Materialverteilung wie beim Neubau (s.o.), die alten Rohre (vorw. Beton, Mauerwerk und Steinzeug) werden abgebaut.
- Bei der geschlossenen Erneuerung (20 %) erfolgt die Materialverteilung wie beim Neubau, die alten Rohre (vorw. Beton und Steinzeug) verbleiben im Boden.

Damit ergeben sich folgende jährliche Materialflüsse durch Sanierung der Kanalisation (Renovierung, Erneuerung):

Tab. 79: Jährlicher Materialbedarf im Kanalnetz durch Sanierung (Renovierung und Erneuerung)

Nennweite	bis DN300	> DN300 bis DN400	> DN400 bis DN600	> DN600 bis DN800	> DN800	Gesamt
Kanalnetzlänge (km)	1.250	625	325	200	100	3.500
Material (1.000t)						
Beton	0	47	87	121	143	398
Zementmörtel	1	1	0	0	0	2
Steinzeug	30	25	8	9	4	77
Kunststoff	12	12	9	3	2	38
Stahl	2	1	1	1	0	5
Gesamt	45	86	107	135	149	521

Quelle: Eigene Berechnungen

Insgesamt werden durch Renovierung und Netzerneuerung jährlich über 500.000 Tonnen Baustoffe in das Kanalnetz verbaut⁵⁰ – zum überwiegenden Teil Beton, gefolgt von Steinzeug und Kunststoff. Die relativ geringe Menge im Vergleich zum Bestand (0,35 %) resultiert aus sehr geringen Investitionen in die Kanalsanierung – welche weit unter empfohlenen Netzerneuerungsraten liegen – sowie daran, dass sich neue Rohrmaterialien etablieren, welche ein erheblich geringeres Gewicht als ältere Baumaterialien aufweisen.

Unter der Prämisse, dass die Altröhre bei offener Erneuerung abgebaut werden, ergibt sich darüber hinaus folgender jährlicher Abbruch:

⁵⁰ Setzt man die „normale“ Erneuerungsrate von 1,5 % an (Koziol et al. 2006), so erhöht sich der jährliche Materialinput durch Erneuerung auf etwa 1,5 Mio. Tonnen.

Tab. 80: Jährlicher Abbruch Kanalnetz in Deutschland durch offene Erneuerung

Nennweite	bis DN300	> DN300 bis DN400	> DN400 bis DN600	> DN600 bis DN800	> DN800	Gesamt
Kanalnetzlänge (km)	1.000	500	260	160	80	2.000
Material (1.000t)						
Beton	36	90	84	108	100	418
Steinzeug	32	18	9	4	4	66
Kanalklinker				18	25	44
Zementmörtel				5	7	12
Kunststoff	1	1	0	0	0	2
Gesamt	69	109	93	135	136	542

Quelle: Eigene Berechnungen

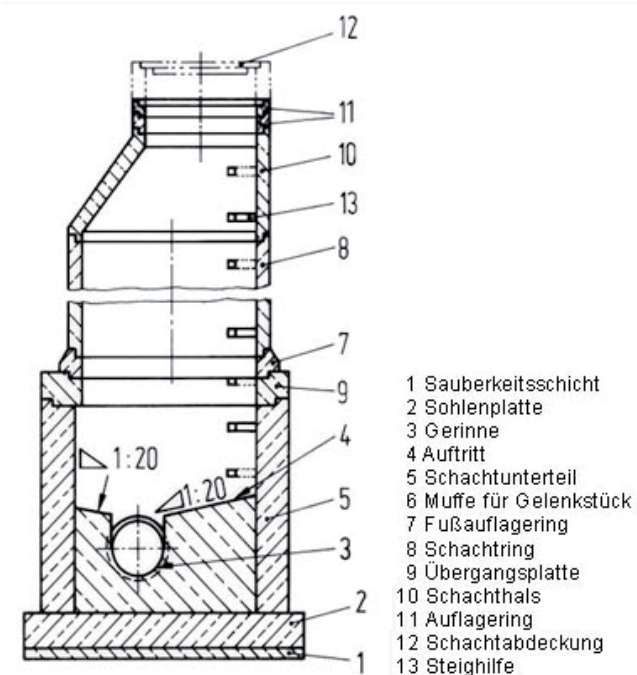
Wenngleich nur ein Teil der Altrohre bei der Sanierung ausgebaut wird, wird in etwa so viel Bauschutt gehoben, wie bei den gesamten Sanierungsaktivitäten eingebaut wird. Auch hier macht sich die Entwicklung hin zu leichteren Rohrmaterialien bemerkbar. Bei der geschlossenen Erneuerung verbleiben die Altrohre im Boden – etwa 135.000 Tonnen jährlich.

4.2.2 Schächte

Schächte für erdverlegte Abwasserkanäle und –leitungen nehmen den größten Anteil an den Bauwerken der Ortsentwässerung (Bauwerke zur Überwindung von Höhenunterschieden, Inspektionsöffnungen, Kreuzungsbauwerke, Regenüberlaufbauwerke, Einlaufbauwerke (Straßenabläufe), Auslauf- sowie Schieberbauwerke, Schächte) ein. Der Schacht ist gemäß der Vornorm DIN V 4034, Teil 1, als ein Bauwerk für einen erdverlegten Abwasserkanal oder eine erdverlegte Abwasserleitung definiert. Er dient der Be- und Entlüftung, der Kontrolle, Wartung und Reinigung sowie der Zusammenführung, Richtungs-, Neigungs- und Querschnittsveränderung von Kanälen und Leitungen (Puhl 2007). Man unterscheidet nach DIN EN 476 Einsteigschächte mit Zugang für Personal sowie Einsteigschächte zum Einbringen von Reinigungsgerät, Inspektions- und Prüfausrüstungen mit gelegentlicher Zugangsmöglichkeit für eine angegurte Person“ sowie Kontrollschächte, welche sich in ihren Mindestgrößen unterscheiden (Stein/Falk 2004).

Diese Schächte können bis zu mehreren Metern im Durchmesser sein und je nach Lage der Kanäle Tiefen bis zu 20 oder mehr Metern haben. Schächte setzen sich zusammen aus dem Schachtunterteil mit Gerinne, Auftritt und Anschlussstück, dem Schachtkörper aus Schachtringen und Schachthals, dem Schachtkopf, den Steighilfen, dem Auflagering sowie der Schachtabdeckung (Abb. 8).

Abb. 8: Schematischer Aufbau eines Einstiegsschachtes



Quelle: Stein (2004)

In den bestehenden öffentlichen Kanalnetzen sind Fertigteilschächte aus Beton und Stahlbeton weit verbreitet. Daneben finden seit einigen Jahren Fertigteilschächte aus den Materialien Polymerbeton und Steinzeug, Kunststoffen wie Polyethylen hoher Dichte (PE-HD), Polyurethan (PUR), Polyvinylchlorid (PVC) oder Polypropylen (PP) sowie aus glasfaserverstärkten Reaktionsharzen (GfK) Verwendung (Puhl 2007). Die früher aus Kanalklinkersteinen vor Ort gemauerten Abwasserschächte sind seltener zu finden. Neben den werkstoffeinheitlichen Ausführungen finden sich auch Schächte, die aus zwei oder mehreren Werkstoffen bestehen: Das Schachtunterteil wird gemauert oder mit Ortbeton gegossen und der weitere Aufbau aus Betonfertigteilen erstellt. Bei der Erneuerung von älteren, nicht mehr standsicheren Schächten aus Mauerwerk wird beispielsweise zum Teil der Schachtkörper bis auf das Schachtunterteil durch Betonfertigteile ersetzt (Puhl 2007).

Für den Ein- und Ausstieg sind Abwasserschächte mit *Steighilfen* ausgerüstet, Steigleitern sind seltener. In der Regel werden ein- oder zweiläufige Steigeisengänge eingesetzt, welche zumeist bereits werksseitig eingebaut werden. Es gibt sie in beschichteter und unbeschichteter Ausführung, der Abstand zwischen den einzelnen Steighilfen muss 250 – 330 mm betragen, bei gemauerten Schächten jeweils in der dritten Klinkerschicht. Jedoch haben einige Kanalnetzbetreiber die ortsfesten Steighilfen aus den Abwasserschächten entfernen lassen und verwenden ausschließlich portable Einstiegshilfen (Puhl 2007).

Schachtabdeckungen setzen sich zusammen aus dem Rahmen, dem Rost und dem Deckel. Sie bestehen in der Regel aus Gusseisen, Stahlguss, Walzstahl, einer Werkstoffkombination mit Beton oder aus Stahlbeton. Neuerdings können für die Herstellung von Schachtabdeckungen zusätzlich rostfreier Stahl, Aluminium, faserverstärkter Kunststoffverbund und Polypropylen verwendet werden, wohingegen der Einsatz von Stahlguss nicht mehr vorgesehen ist. In den letzten Jahren werden vermehrt Schachtabdeckungen aus duktilem Gusseisen (Gusseisen mit Kugelgraphit) angeboten, welche ein geringeres Gesamtgewicht aufweisen können als andere Werkstoffe (Puhl 2007).

Im Schachtunterteil befindet sich ein Auftritt (Berme), der bei einem Durchmesser des abgehenden Kanals bis DN500 beidseitig in Höhe des Scheitels liegen soll. Der Arbeitsraum über dem Auftritt sollte möglichst zwei Meter hoch sein (Puhl 2007).

Ermittelter Gesamtmaterialbestand

Angaben zur Anzahl von Schächten in Deutschland variieren. Das IKT Institut für Unterirdische Infrastruktur Gelsenkirchen spricht von rund zehn Millionen Abwasserschächten (Puhl 2007; Gillar 2008). Die DWA hingegen hat in einer Umfrage von 2004 12 Mio. Schächte und Bauwerke genannt (Wagner 2007). Reckerzügl gibt in seiner Arbeit (Reckerzügl 1997) an, dass etwa alle 45 m ein Schacht im Kanalnetz liegt. Der Schachtabstand sollte bei Kanälen aller Dimensionen in der Regel 100 m nicht überschreiten.

Der Minstdurchmesser für viereckige oder runde Schächte sollte im Bereich der öffentlichen Kanalisation einen Meter betragen. Der Schacht sollte so geräumig sein und die Einstiegsöffnung so angeordnet werden, dass das Reinigen der Kanäle vom Schacht aus möglich ist (Puhl 2007). Unsere Berechnungen basieren daher auf einem Schacht-Durchmesser von einem Meter.

Die Schachttiefe ist abhängig von der Überdeckungshöhe (früher Tiefenlage) der Kanalisation. Abwasserkanäle haben nach DVGW W400 eine Mindestüberdeckungshöhe⁵¹ von 2 Metern (DVGW 2004). Die Mindestüberdeckungshöhe ist im Allgemeinen abhängig von der Tiefe der zu entwässernden Kellersohlen und variiert stark in Abhängigkeit von der Topographie. Kanalnetze werden unterhalb von Versorgungsleitungen verlegt. Die mittlere Überdeckungshöhe für Kanäle beträgt in städtischen Entwässerungsgebieten in der Regel 3,0 bis 4,0 m, in Vorortsiedlungen kann sie auch geringer sein (Stein 2004). Dabei ist davon auszugehen, dass Kunststoffschächte im Schnitt kürzer sind als Betonschächte, da sie im Verteilungsnetz vorgelagert und damit in geringerer Tiefe liegen als Betonschächte. Daher wird für Betonschächte (in Anlehnung an Jekel 2006) eine Durchschnittstiefe von 3 m zugrunde gelegt (über Rohrauslass), für Kunststoffschächte eine Durchschnittstiefe von 2,5 m.

Die Werkstoffverteilung wurde von Puhl (2007) übernommen (siehe Tab. 81). Massenbeispiele für Schächte aus verschiedenen Werkstoffen (Beton, Mauerwerk, Kunst-

⁵¹ Die Überdeckungshöhe bezeichnet die lotrechte Entfernung von der Oberkante des Rohrschaftes bis zur Oberfläche nach DIN EN 1610.

stoff) beruhen auf Herstellerangaben⁵² und erlauben eine Hochrechnung auf die Gesamtmaterialmenge.

Tab. 81: Werkstoffverteilung der Schachtsysteme in % des gesamten Abwasserschachtbestandes

Baustoff	Anteil	Schächte
Beton	69,80 %	6.980.000
Mauerwerk	28,80 %	2.880.000
Kunststoff	0,30 %	30.000
Sonstiges	1,10 %	110.000
Gesamt	100,00 %	10.000.000

Quelle: Eigene Berechnungen auf der Grundlage von Puhl (2007)

Eine weitere Differenzierung nach Beton / Stahlbeton und verschiedenen Kunststoffen ist auf Grundlage der vorhandenen Datenbasis nicht möglich. Die Materialarten Klinker und Zementmörtel beruhen auf einer Schätzung der Massen und Massenanteile in Mauerwerksschächten, da keine Daten vorliegen. Der Bestand an Gusseisen resultiert aus den Schachtabdeckungen, für die ein Beton-Gusseisen-Deckel (BeGu-Deckel) als Referenzobjekt vorliegt. Der genaue Gusseisenanteil in der BeGu-Abdeckung konnte jedoch nicht ermittelt werden und beruht auf einer Schätzung.

Tab. 82: Materialbestand Schächte in Deutschland 2007⁵³

Materialbestand Schächte in Deutschland	Beton-Schacht	Ziegel-Schacht	Kunststoff-schacht	Masse Gesamt
Anzahl in D	6.980.000	2.880.000	30.000	9.890.000
	Masse/ Schacht (t)	Masse / Schacht (t)	Masse / Schacht (t)	1.000t
Beton	4,508	0,143	0,263	31.886
Gusseisen	0,035	0,035	0,035	346
Klinker		2,732		7.868
Zementmörtel		0,76		2.189
Kunststoff (PE-HD, PUR, PVC, PP)			0,196	6
Gesamtmasse (t)	4,543	3,67	0,494	42.295

Quelle: Eigene Berechnungen auf Grundlage von Puhl (2007) und Herstellerangaben

⁵² Die Massenangaben zum Schacht aus Mauerwerk beruhen auf Schätzungen, da keine Herstellerangaben verfügbar sind.

⁵³ Die Daten wurden an geänderte Annahmen angepasst. Unter anderem wurde in Anlehnung an Jekel et al. 2006 die Durchschnittstiefe der Betonschächte auf 3m reduziert, was einen entsprechend geringeren Materialeinsatz nach sich zieht.

Entsprechend dominieren mineralische Baustoffe den Gesamt-Materialstock in Höhe von über 40 Millionen Tonnen: Dieser wird dominiert von Beton oder Stahlbeton, gefolgt von Klinker und Zementmörtel (siehe Tab. 82).

Ermittlung der jährlichen Materialflüsse

Neubau / Rückbau

Der Neubau von Schächten erfolgt analog zur Erweiterung des Kanalnetzes. Bei einer jährlichen Zunahme der Kanalisation um 10.530 km kann man von ca. 200.000 neuen Schächten jährlich ausgehen. Im Neubau werden so gut wie keine Schächte aus Mauerwerk gebaut, daher basieren die Berechnungen für den Neubau auf einer Werkstoffverteilung von geschätzten 90 % Beton und 10 % Kunststoff. Insgesamt ergibt sich durch die Erweiterung des Kanalnetzes ein Zugang zum Materialstock der Schächte in Höhe von rund 800.000 Tonnen jährlich, fast ausschließlich Beton (Tab. 83). Wie beim Kanalnetz handelt es sich hier um eine Bruttozunahme, in der ein eventueller Rückbau schon enthalten ist. Zahlen hierzu fehlen jedoch.

Sanierung

Angesichts der großen Bedeutung von Abwasserschächten im Kanalnetz wird besonderes Augenmerk auf deren baulichen und betrieblichen Zustand geworfen (Puhl 2007, 39). Nach Angaben der DWA sind 18 % der 12 Mio. Schächte und Bauwerke in Deutschland schadhaft und erfordern auf kurze oder mittlere Frist eine Sanierung (Wagner 2007). Das IKT schätzt, dass 1 Mio. Schächte sanierungsbedürftig sind, was einem Gesamtsanierungsbedarf von 3,5 Mrd. Euro entspräche (Gillar 2008).

Je nach Schadensbild des Schachtes kommen bei Sanierungsmaßnahmen Reparatur-, Renovierungs- oder Erneuerungsverfahren zum Einsatz. Reparaturen umfassen Maßnahmen zur Behebung örtlich begrenzter Schäden, unter dem Begriff Renovierung sind Maßnahmen zur Verbesserung der aktuellen Funktionsfähigkeit von Schächten unter vollständiger Einbeziehung ihrer ursprünglichen Substanz zu verstehen (Puhl 2007, 61). Die Erneuerung bedeutet die Herstellung eines neuen Schachtes an gleicher Position.

Es liegen vom IKT einige Zahlen vor zu verwendeten bzw. potenziell möglichen Sanierungsverfahren. Bspw. liegen Schätzungen vor, nach denen sich 12 % aller Schächte grundsätzlich für den Einsatz von Beschichtungsverfahren eignen (Puhl 2007).

Nach Angaben des IKT sind ca. 10 %, das heißt eine Million Schächte, sanierungsbedürftig⁵⁴ (Gillar 2008). Wenn man davon ausgeht, dass Schächte im Zuge der Netzerneuerung in offener Bauweise erneuert werden, so werden bei 2.000 km erneuertem Kanalnetz 40.000 Schächte (mit-)erneuert (20 Schächte / Kilometer Kanalnetz). Das entspricht einer Erneuerungsrate von 0,4 %. Renovierungs- und Reparaturverfahren

⁵⁴ Andere Quellen nennen 1,2 Millionen Schächte sanierungsbedürftig (Koziol et al. 2006: 82).

werden aufgrund mangelnder Datengrundlage nicht betrachtet. Unter der Prämisse, dass bei offener Erneuerung die alten Schächte abgebrochen werden, steht dem jährlichen Material-Input von rund 160.000 Tonnen ein leicht erhöhter Output durch den jährlichen Abbruch gegenüber. Dies resultiert daraus, dass gemauerte (30 %) und Beton-Schächte (70 %) abgebrochen werden, wohingegen vermehrt leichte Kunststoffschächte bei der Erneuerung eingesetzt werden (Annahme wie bei Neubau: 90 % Beton, 10 % Kunststoff).

Tab. 83: Jährliche Zu- und Abgänge Kanalschächte durch Neubau und Sanierung

	Neubau (in 1.000 t)	Erneuerung (in 1.000 t)	Abbruch (in 1.000 t)
Beton	817	163	128
Klinker			33
Zementmörtel			9
Kunststoff	4	1	
Gusseisen	7	1	1
Gesamt	828	166	171

Quelle: Eigene Berechnungen

4.2.3 Pumpwerke

Bei zu geringem Gefälle, Steigungen oder um die Rohrdurchmesser kleiner zu halten, müssen auch in Kanalisationen Pumpenanlagen eingesetzt werden. Der Einsatz einer Pumpe hängt wesentlich vom Gefälle des Kanals – also auch von den örtlichen Gegebenheiten – ab und kann nicht pauschal z.B. über die Länge des Netzes ermittelt werden. Außerdem können der Aufbau und die Größe der Pumpen sehr unterschiedlich sein. Zumeist erfolgt die Förderung im Kanalnetz mit Kreiselpumpen, bei Pumpwerken vor der Kläranlage häufig mit Kreiselschnecken (Imhoff/Imhoff 2007).

Nach aktuellem Kenntnisstand ist die Anzahl an Pumpwerken im Kanalnetz in Deutschland nicht bekannt. Nach Angaben des IKT summieren sich die in den Händen der öffentlichen Netzbetreiber befindlichen Pumpwerke in Nord-Rhein-Westfalen jedoch nach einer Umfrage in 2001 auf rd. 6.300 Anlagen (IKT 2004). Der Lagebericht 2005 des Landeswasserverbandstag Brandenburg e.V. listet für 2005 1.515 Pumpwerke und 2.897 Hauspumpstationen alleine in seinen Mitgliedsverbänden (LWT 2005).

Hauptbestandteile eines Pumpwerkes sind Pumpen-, Motoren- und Schaltraum, Pumpensumpf, Traforaum und die Betriebsräume. An Anlagen sind neben den erforderlichen Pumpen der Zulaufkanal, Rechen (teilweise), Sandfang (teilweise), Saugrohr, Druckrohr, Auslaufschacht des Druckrohres sowie Vorflutkanal des Druckrohres zu nennen (Hosang/Bischof 1998). Daneben sind diverse Mess- und Steuereinrichtungen erforderlich. Abwasserpumpen erfordern meist einen größeren Durchgangsquerschnitt

für das Laufrad als Reinwasserpumpen (Kapitel 4.2.7) aufgrund möglicher Sperrstoffe im Abwasser (Hosang/Bischof 1998).

Erste Schätzungen ließen auf eine mittlere stoffliche Relevanz der Pumpwerke in der Kanalisation schließen. Da sie jedoch ausgesprochen heterogen sind, und eine ausreichende Datenbasis bisher nicht vorliegt, sahen wir von einer weiteren Betrachtung der Pumpwerke im Kanalnetz ab.

4.2.4 Regentlastungsanlagen

Da Kläranlagen bei Regen eine begrenzte Kapazität aufweisen, muss Regenwasser aus Mischwasserkanälen unmittelbar in die Gewässer entlastet werden. Ziel der Regenwasserbehandlung ist die weitestmögliche Reduzierung der Gesamtemissionen aus Regentlastungen und Kläranlagen durch eine sinnvolle Begrenzung des Regenabflusses zur Kläranlage (Imhoff/Imhoff 2006; Bayer et al. 2004). Das kann mit verschiedenen Ansätzen erreicht werden: von der Abflussvermeidung bis zum Stoffrückhalt.

Folgende Entlastungsbauwerke sind zu unterscheiden (nach Imhoff/Imhoff 2006):

- *Regenüberlauf (RÜ)*: Bei stärkerem Regen wird ein Teil des Mischwassers in die Gewässer entlastet.
- *Regenüberlaufbecken (RÜB)*: sind Entlastungsbauwerke für Mischsysteme mit vorgeschaltetem Speichervolumen mit Rückhalte- und Klärfunktion. Wesentliche Bestandteile sind der Überlauf in das Gewässer und der Ablauf zur Kläranlage. Das gespeicherte Regenwasser wird zeitverzögert in die Kläranlage abgegeben; ist die Beckenkapazität ausgelastet, erfolgt ein Überlauf in den Vorfluter. Man unterscheidet Fangbecken, Durchlaufbecken, Stauraumkanäle und Verbundbecken.
- *Regenrückhaltebecken (RRB)*: werden in Misch- und Trennkanalisation zur Entlastung der weiterführenden Kanäle im Netz angeordnet. Sie sammeln das Wasser bei starken Regengüssen und geben es verzögert wieder ab, um allzu große Abflussspitzen zu verhindern. Hierzu zählen auch Kanalstauräume.
- *Regenklärbecken (RKB)*: sind Absetzbecken für verschmutztes Regenwasser im Trennverfahren.

Der überwiegende Teil der Anlagen besteht aus Stahlbeton, abgesehen von den Regenrückhaltebecken, welche häufig in Erdbauweise errichtet werden. In letzter Zeit setzen sich vermehrt Stauraumkanäle (fungierend als RÜB oder RRB) durch, welche aus PE oder GFK bestehen.

Neben dem Becken selber gibt es jeweils noch einen Zulaufkanal sowie eine – meist mechanische oder elektrische – Drosseleinrichtung (Wirbelventil, Wirbeldrossel, Hydroslide o.a.). Wasserwirtschaftlich bedeutsame Regentlastungsanlagen werden mit Messeinrichtungen zur Erfassung des Entlastungs- und Betriebsverhaltens ausgestattet.

Ermittelter Gesamtmaterialbestand

Nach Angaben des Statistischen Bundesamtes gab es in Deutschland im Jahr 2007 66.224 Regenentlastungsanlagen unterschiedlicher Bauart (Destatis 2009), davon 23.772 Regenüberlaufbecken (RÜB), 3.194 Regenklärbecken (RKB) und 20.767 Regenüberläufe (RÜ). Regenüberlaufbecken sind die am häufigsten vorkommenden Bauwerke zur Mischwasserbehandlung. Ihre Größe reicht von 50 m³ (Mindestgröße bei Fangbecken) bis zu über 10.000 m³. Daten zur Material- und Größenverteilung liegen nicht vor.

Aufgrund unzureichender Datenlage werden Regenrückhaltebecken aus der Betrachtung ausgeklammert. Vereinfachend wird 100 % Betonbauweise (davon 50 % in Stahlbeton) für die untersuchten Regenüberlaufbecken und Regenklärbecken sowie eine ähnliche Konstruktion und Materialverbrauch unterstellt.

Sämtliche Berechnungen basieren auf der Arbeit von Reckerzügl 1997 für 4 Regenüberlaufbecken à 400 m³ (Tab. 84). Ergänzend wurden die Betonmengen anhand von Massenbeispielen auf ihre Plausibilität geprüft. Es muss jedoch betont werden, dass aufgrund der mangelhaften Datensituation insgesamt lediglich Größenordnungen angegeben werden können.

Tab. 84: Materialbestand Regenentlastungsanlagen nach Speichervolumen (geschätzt)

Stahlbeton	m³/m³	0,7
Steinzeug	t/m³	0,003725
Keramik	t/m³	0,0000125
Grauguss	t/m³	0,00005
Edelstahl	t/m³	0,0015
Aluminium	t/m³	0,00000625
Kupfer	t/m³	0,000125
PE-Rohr	t/m³	0,0000125

Quelle: Berechnet nach Reckerzügl (1997)

Es ergibt sich somit für Regenentlastungsanlagen (Regenüberlaufbecken, Regenklärbecken und Regenüberläufe) ein Materialbestand von knapp 34 Millionen Tonnen, davon zum überwiegenden Teil Beton:

Tab. 85: Materialbestand Regenentlastungsanlagen in Deutschland 2007

	RÜB + RKB	RÜ	Masse gesamt
Anzahl	26.966	20.767	
Speichervolumen (m³)	17.877.000		
Material (1.000t)			
Beton	28.206	4.585	32.791
Betonstahl	576	191	767
Steinzeug	67		67
Grauguss	1		1
Stahl V4A (12%Ni, 17% Cr)	27		27
Kupfer 60:40	2		2
Gesamt	28.879	4.967	33.655

Quelle: Eigene Berechnungen auf Basis von Destatis (2009), Reckerzügl (1997) und Angaben von Bau-firmen

Neubau / Rückbau

Vor dem Hintergrund zunehmender Starkregenereignisse hat die Regenwasserbewirt-schaftung eine wichtige Rolle inne. Entsprechend hat die Menge an Regenentlas-tungsbauwerken in den letzten neun Jahren zugenommen. Durchschnittlich wurden 590 Regenüberlaufbecken und Regenklärbecken im Jahr gebaut mit einem Gesamt-speichervolumen von 322.444 m³.⁵⁵ Der Materialinput erfolgt, wie im Bestand, in Ab-hängigkeit vom Speichervolumen (Tab. 84). Damit werden jährlich durch den Neubau von Regenüberlauf- und Regenklärbecken über 500.000 Tonnen Beton verbaut (Tab. 86). Ein Rückbau von Regenüberlaufbecken erfolgt nur in Einzelfällen und ist somit nicht relevant.

⁵⁵ Wie bereits bei der Berechnung des Materialbestandes werden RRB aufgrund der schlechten Datenla-ge nicht berücksichtigt. Des Weiteren entfallen im Neubau die Regenüberläufe ohne Speicherbe-cken, da hier kein eindeutiger Trend über die letzten neun Jahre erkennbar ist und die Mengen ver-nachlässigbar sind.

Tab. 86: Jährlicher Materialbedarf für Regenüberlaufbecken (RÜB) und Regenklärbecken (RKB) durch Neubau

	RÜB + RKB
Anzahl	590
Speichervolumen (m³)	322.444
Material (1.000t)	
Beton	509
Betonstahl	10
Steinzeug	1
Gesamt	521

Quelle: Eigene Berechnungen

Sanierung

Betonbauwerke haben eine Nutzungsdauer von 30 bis 40 Jahren. Regenentlastungsbauwerke werden in der Regel durch eine umfassende Betonsanierung wieder hergestellt. Eine vollständige Erneuerung wird eher selten vorgenommen. Aufgrund der unzureichenden Datenlage wird die Sanierung hier nicht berücksichtigt.

4.2.5 Kläranlagen

Der Großteil des Abwassers in Deutschland wird über zentrale Kläranlagen aufbereitet. Diese wurden insbesondere in den letzten Jahrzehnten ausgebaut und die Anschlussgrade an kommunale mechanisch-biologische Anlagen und Anlagen mit gezielter Stickstoff und Phosphatelimination erhöht. Mittlerweile werden 95 % der behandelten Abwassermenge in biologischen Kläranlagen mit gezielter Nährstoffelimination behandelt (BMU 2006).

Kläranlagen bestehen hauptsächlich aus unterschiedlichen Klärbecken, einigen Gebäuden und technischen Anlagen (Pumpen, Überwachungsgeräte u.a.). Für eine Ressourcenermittlung sind die Massen der Becken sowie die technischen Einrichtungen relevant. Die Bauwerke einer konventionellen Kläranlage (überwiegend kommunales Abwasser) können ihrem Zweck nach in 4 Gruppen unterschieden werden (Tab. 87):

Tab. 87: Kläranlagenbauwerke nach ihrem Zweck

Mechanische Reinigung	Einlauf, Rechen, Siebe, Sandfang, Vorklärbecken
Biologische Reinigung	Biologische Stufe, Nachklärbecken, Filtration, Auslauf
Chemische Reinigung	Phosphor-Elimination, Fällungsstufen, Denitrifizierungen
Schlamm- und Gasbehandlung	Faulbehälter, Betriebsgebäude, Eindicker, Gasbehälter, Schlamm-trockenbeete, thermische Schlammbehandlung, künstliche Trocknung, Schlamm-zwischenlager, Schlammverbrennung

Quelle: Nach Hosang/Bischof (1998)

Dazu kommt das umfangreiche unterirdische Netz von Druckrohren, Düken, Schlamm-, Luft- und Gasleitungen und Kanälen. Größere Kläranlagen haben darüber hinaus feste Straßen.

Ermittelter Gesamtmaterialbestand

Nach Angaben des Statistischen Bundesamtes gab es in 2007 in Deutschland 9.933 Abwasserbehandlungsanlagen, davon 9.740 mechanisch-biologische Anlagen (Destatis 2009, Tabelle 10). DIN 19569 unterscheidet 5 Größenstufen (Tab. 88). Kleine Anlagen dominieren in Deutschland hinsichtlich Anzahl, jedoch wird der Großteil des Abwassers in großen Anlagen (Klasse IV und V) behandelt. Die durchschnittliche Ausbaugröße betrug in Deutschland 2007 15.228 EW (Einwohnerwerte⁵⁶).

Tab. 88: Kläranlagen in Deutschland nach Größenklassen und Kapazität 2007

Größenstufen nach DIN 19569	Anzahl Anlagen	Ausbaugröße (1.000 EW)	durchschn. Ausbaugröße (EW)
I < 1.000 EW	4.329 44 %	1.533 1 %	354
II >1.000-5.000 EW	2.504 25 %	6.158 4 %	2.459
III >5.000-10.000 EW	867 9 %	6.195 4 %	7.145
IV >10.000-100.000 EW	1.981 20 %	60.356 40 %	30.467
V > 100.000 EW	252 3 %	77.022 51 %	305.643
Total	9.933	151.264	15.228

Quelle: Eigene Berechnungen nach Destatis (2009, Tabelle 10.2)

Da keine Massenbeispiele differenziert nach Art und Anzahl der Verfahrensstufen vorliegen, werden diese im Rahmen der Hochrechnung vernachlässigt. Aufgrund der mittlerweile generell fast flächendeckenden, und insbesondere in großen Anlagen vorliegenden Ausstattung mit mechanisch-biologisch-chemischen Verfahrensstufen inklusive Schlammbehandlung, ist eine Vereinfachung zwar gegeben, jedoch nach unserer Auffassung zulässig.

⁵⁶ Einwohnerwerte dienen der Bemessung von Abwasserbehandlungsanlagen. Sie ergeben sich aus der Summe der angeschlossenen Einwohner und dem Referenzwert für die Schmutzfracht aus Industrie, Landwirtschaft, Gewerbe (Einwohnergleichwert) (Destatis 2009).

Studien geben in den meisten Fällen lediglich die verbauten Massen an Beton und Stahl für verschiedene, zumeist große, Kläranlagen an (Rendchen 1995; Doka 2007; Reckerzügl 1997).

Tab. 89: Materialeinsatz für die Errichtung ausgewählter Kläranlagen in Deutschland und der Schweiz

Standort		Twann (CH)	Marien- heide	Ergolz (CH)	Gotha	Witten- berg	Du- Kasslerfeld	Bottrop
Kapazität	EW	1.600	20.000	25.000	150.000	180.000	450.000	1.340.000
Größenklasse		II	IV	IV	V	V	V	V
Beton	m ³	1.410	13.386	21.307	21.300	28.000	52.000	240.000
Stahl	t	105	566	1.588	2.100		6.000	35.000
Beton pro EW	m ³	0,88	0,669	0,85	0,14	0,16	0,12	0,18
Stahl pro EW	t	0,066	0,028	0,064	0,014	0,000	0,013	0,026

Quellen: Eigene Berechnung nach Rendchen (1995), Modernbau GmbH, Doka (2007), Reckerzügl (1997)

Dabei nimmt die Masse an verbautem Beton mit steigender Ausbaugröße pro Einwohnerwert ab, die Masse an verbautem Stahl nimmt weniger stark ab. Ein linearer Zusammenhang ist jedoch, abweichend von den Ecoinvent-Daten (Doka 2007), mit den uns vorliegenden Daten nicht feststellbar. Ausgehend von den vorliegenden Massenbeispielen wurden die Beton- und Stahlmassen für verschiedene Größenklassen pro Einwohnerwert geschätzt (Tab. 90).

Tab. 90: Materialeinsatz-Faktoren Beton und Stahl für Kläranlagen

		bis 5.000 EW	> 5.000 EW - 100.000 EW	> 100.000 EW
Beton / Ausbaugröße	m ³ /EW	0,9	0,7	0,15
Stahl / Ausbaugröße	t/EW	0,07	0,04	0,02
Faktor weitere Stoffe		1,75	1	0,5

Quelle: Eigene Schätzung

Reckerzügl (1997) hat in seiner Arbeit eine differenzierte Material-Intensitäts-Analyse (MAIA) für eine Beispielkläranlage (20.000 EW) durchgeführt, für die daher detaillierte Materialbestände angegeben sind (Tab. 91).

Tab. 91: Materialeinsatz Kläranlage nach Reckerzügl 1997

Baustoff	Menge (t)	t/EW
Beton B25	30540,62	1,527031
Stahlbeton (4 % Stahl)	269,1	0,013455
Stahl	498,02	0,024901
Edelstahl	57,39	0,0028695
Betonstahl	10,764	0,0005382
Kalksandstein	602,58	0,030129
Steinzeug	19,96	0,000998
Aluminium	3,09	0,0001545
Kupfer	13,31	0,0006655
Flachglas	1,13	0,0000565
Glaswolle	14,94	0,000747
PE Rohr	12,26	0,000613
PVC Rohr	16,56	0,000828
Gesamtmaterialeinsatz	32.060	1,6029862

Quelle: Berechnet nach Reckerzügl (1997); Beispiel-Kläranlage Marienheide (20.000 EW), repräsentativ für Gemeindegrößenklassen 10.000 – 20.000 Einwohner, 3 Reinigungsstufen

Um diese Massen auf andere Größenklassen zu extrapolieren, wurden die Änderungsfaktoren von Stahl für kleinere bzw. größere Anlagen angewandt und ebenso auf die durchschnittliche Ausbaugröße hochgerechnet. Insgesamt ergibt sich ein geschätzter Materialbestand in deutschen Kläranlagen wie folgt:

Tab. 92: Materialbestand Kläranlagen in Deutschland

Größenklasse	> 1.000 - < 1.000 EW 5.000 EW		> 5.000 - 10.000 EW	> 10.000 - 100.000 EW	> 100.000 EW	Gesamt
Anzahl	4.329	2.504	867	1.981	252	9.933
Ausbaugröße (1.000EW)	1.533	6.158	6.195	60.356	77.022	151.264
Material (1.000t)						
Beton	3.173	12.747	9.974	97.173	26.573	149.640
Stahl, nicht diff.	107	431	248	2.414	1.540	4.741
Kalksandstein	81	325	187	1.818	1.160	3.571
Steinzeug	3	11	6	60	38	118
Aluminium	0	2	1	9	6	18
Kupfer	2	7	4	40	26	79
Flachglas	0	1	0	3	2	7
Glaswolle	2	8	5	45	29	89
PE Rohr	2	7	4	37	24	73
PVC Rohr	2	9	5	50	32	98
Gesamt	3.372	13.547	10.434	101.651	29.430	158.433

Quelle: Eigene Berechnungen

Der Gesamtmaterialbestand, welcher im Jahr 2007 in deutschen Kläranlagen gebunden war, beläuft sich nach unseren Berechnungen hochgerechnet auf knapp 160 Millionen Tonnen – davon zum überwiegenden Teil (knapp 150 Mio. Tonnen) Beton.

Es ist anzumerken, dass sich die hier errechneten Werte teilweise von den Ecolnvent-Daten unterscheiden. Doka (2007) gibt insbesondere für Beton und Stahl erheblich höhere Werte an. Damit ergibt sich hochgerechnet nach Anlagenzahl über die einzelnen Größenklassen ein dreifacher Materialbestand in Höhe von rund 450 Mio. Tonnen. Dies liegt nach Hillenbrand (2009) daran, dass bei Doka im Vergleich zu Reckerzügl (1997) eine vollständigere Erfassung zugrunde liegt und daher die Bedarfswerte entsprechend höher sind. Allerdings liegen die Werte von Doka auch über den uns vorliegenden Massenbeispielen (vgl. Tab. 89), so dass wir uns hier auf die Angaben von Reckerzügl stützen.

Jährliche Materialflüsse

Ein Neubau von Kläranlagen ist, nach erfolgter Angleichung in Ost- und Westdeutschland, in Zukunft nur noch in Maßen zu erwarten. Vor dem Hintergrund geänderter Rahmenbedingungen sind vielmehr Anpassungsmaßnahmen zu erwarten. Anlagen, die noch nicht den geltenden Anforderungen der Abwasserverordnung entsprechen, müssen nachgerüstet werden. Daneben finden vermehrt dezentrale Abwasser-Konzepte Einsatz, welche in Zukunft voraussichtlich eine große Rolle spielen werden.

Der offiziellen Statistik lassen sich die Bestandszahlen an Kläranlagen der verschiedenen Größenklassen von 2001, 2004 und 2005 entnehmen (Destatis 2009). Daraus kann die durchschnittliche jährliche Zu- bzw. Abnahme an Kläranlagen über die letzten sechs Jahre ermittelt werden. Über den durchschnittlichen Materialbestand jeder Größenklasse (Tab. 93) lässt sich somit der gesamte jährliche Materialabbau durch den Abbruch von Kläranlagen ermitteln.

Tab. 93: Materialbestand pro Kläranlage 2007 nach Größenklasse

Größenklasse	< 1.000 EW	> 1.000 - 5.000 EW	> 5.000 - 10.000 EW	> 10.000 - 100.000 EW	> 100.000 EW
durchschn. Ausbaugröße	354	2.459	7.145	30.467	305.643
Material (t)					
Beton	733,04	5.090,68	11.503,98	49.052,58	105.446,79
Stahl, nicht diff.	24,79	172,15	285,81	1.218,70	6.112,86
Kalksandstein	18,67	129,67	215,28	917,95	4.604,36
Steinzeug	0,62	4,30	7,13	30,41	152,52
Aluminium	0,10	0,66	1,10	4,71	23,61
Kupfer	0,41	2,86	4,76	20,28	101,70
Flachglas	0,04	0,24	0,40	1,72	8,63
Glaswolle	0,46	3,21	5,34	22,76	114,16
PE Rohr	0,38	2,64	4,38	18,68	93,68
PVC Rohr	0,51	3,56	5,92	25,23	126,54
Gesamt	779,01	5.409,98	12.034,10	51.313,00	116.784,84

Quelle: Eigene Berechnungen

Tab. 94: Jährliche Materialflüsse durch Neu- und Rückbau von Kläranlagen

Größenklasse	< 1.000 EW	> 1.000 - 5.000 EW	> 5.000 - 10.000 EW	> 10.000 - 100.000 EW	> 100.000 EW	Gesamt
Anzahl 2007 - 2001	24	-238	-46	21	-16	-255
Ausbaugröße (EW) 2007 - 2001	-50	-351	-207	1.510	-6.873	-5.971
jährl. Änd. Anzahl 07-01	4	-40	-8	4	-3	-43
jährl. Änd. Ausb. 07-01 (EW)	-8	-59	-35	252	-1.146	-996
Material (1.000t)						
Beton	3	-204	-92	196	-316	-413
Stahl, nicht diff.	0	-7	-2	5	-18	-23
Kalksandstein	0	-5	-2	4	-14	-17
Gesamt	3	-216	-96	205	-350	-455

Quelle: Eigene Berechnungen auf Basis von Destatis (2009)

Über 650.000 Tonnen Material, zum Großteil Beton, werden durch den Rückbau von kleinen Anlagen (1.000 bis 10.000 EW) und vereinzelt sehr großen Anlagen (>100.000 EW) abgebrochen. Dem steht ein Material-Input von jährlich rund 200.000 Tonnen Material gegenüber.

Sanierung

Erneuert werden vorwiegend technische Einrichtungen wie Pumpen, Kompressoren, Steuerungseinheiten und Filtermaterialien. Bei Betonbecken wird in den meisten Fällen eine Betonsanierung durchgeführt, welche mengenmäßig nicht ins Gewicht fällt. Daher werden die jährlichen Flüsse durch Sanierung (Erneuerung und Renovation) im Bereich der Kläranlagen nicht berücksichtigt.

4.3 Kumulierter Materialaufwand

Durch den hohen Anteil an mineralischen Baustoffen in der Wasser- und Abwasserinfrastruktur (bedingt vor allem durch die Rohrbettung) liegt der kumulierte Materialaufwand in der gleichen Größenordnung wie der direkte Materialeinsatz.

Für die untersuchte Wasserinfrastruktur (Talsperren, Wasserwerke, Leitungsnetz, Wasserspeicher) ergibt sich folgender kumulierter Materialaufwand:

Tab. 95: Kumulierter Materialaufwand der Wasserinfrastruktur

in 1.000t		MIT-Koeff. in t/t	MA für Bestand	kum. MA Bestand	jährl. MA Neu- und Ausbau	kum. MA Neu- und Ausbau	jährl. MA Inst.	kum. MA Inst.
mineralische Rohstoffe	Kies/Sand	1,18	423.642	499.898	1.525	1.800		
	Naturstein	1,42	55.458	78.750	144	204		
	Beton	1,33	148.747	197.834	73	97		
	Faserzement	3,22	1.106	3.561				
	Zementmörtel**	1,50	688	1.032	5	8	32	48
	Quarzsand	1,42	893	1.268				
	gesch. Vermiculit*	1,00	62	62				
	Ziegel	2,11	577	1.217				
metallische Rohstoffe	Guss-/ Roheisen**	7,63	8.215	62.680	13	99	24	183
	Stahl un-/niedriglegiert	1,47	2.141	3.147	5	7		
	Stahl hoch-legiert	9,42	1.640	15.449	6	57	42	396
	Kupfer	179,07	12	2.149				
	Zink	21,76	13	283				
Kunststoffe / Sonstige	PVC	3,47	641	2.224				
	PELD	2,49	50	125			3	7
	PEHD	2,52	243	612	5	13	9	23
Summe gesamt			644.128	870.292	1.776	2.284	110	657

Quelle: Eigene Berechnungen auf Basis von Wuppertal Institut 2003, *= kein MIT-Koeffizient vorhanden, **= MIT-Koeffizient geschätzt

Die MIT-Koeffizienten wurden der Datenbank des Wuppertal Instituts (Wuppertal Institut 2003) entnommen. In einigen Fällen musste der MIT-Wert gesondert berechnet oder geschätzt werden. So wurde zur Ermittlung des MIT-Wertes für die Zementmörtel-Auskleidungen der Trinkwasser-Rohre ein Gemisch aus drei Teilen Sand und einem Teil Hochofenzement zugrunde gelegt und der entsprechende Durchschnittswert von 1,5 angewendet. Für Faserzement (Asbestzementrohre im Leitungsnetz) wird wiederum in der Regel Portlandzement verwendet. Der MIT-Wert für die Gusseisen-Rohre wurde über den Wert für primäres Roheisen abgeschätzt.

Insgesamt liegt der kumulierte Materialaufwand für Neubau und Erweiterung um ein Drittel über dem direkten Materialeinsatz, wohingegen die indirekten Ressourcenflüsse

für Erneuerung und Instandhaltung den Gesamtaufwand um mehr als das Fünffache erhöhen, bedingt durch den Einbau von Stahl- und Gusseisenrohren im Leitungsnetz.

Im Gegensatz zur Abwasser-Infrastruktur gibt es in der Trinkwasserversorgung einen vergleichsweise hohen Bestand an hoch-legiertem Stahl in den Leitungsnetzen, welcher durch die Herstellung in der Hochofenroute einen hohen MIT-Koeffizienten von 9,42 hat. Ebenso erhöht sich der Anteil von Kupfer an den metallischen Rohstoffen im Bestand von 0,1 % auf immerhin 2,7 %. Insgesamt erhöht sich der Anteil der metallischen Rohstoffe am Gesamtmaterialbestand in der untersuchten Wasserinfrastruktur damit von 1,9 % auf 9,3 %. Kunststoffrohre, welche in direkter Konkurrenz vor allem zu Gusseisen-Rohren stehen, haben einen erheblich geringeren MIT-Koeffizienten.

Für die untersuchte Abwasserinfrastruktur (Kanalnetz, Schächte, Regenentlastung, Kläranlagen) ergibt sich folgender kumulierter Materialaufwand:

Tab. 96: Kumulierter Materialaufwand der Abwasserinfrastruktur

in 1.000 t		MIT-Koeff. in t/t	MA für Bestand	kum. MA Bestand	jährl. MA Neu- und Ausbau	kum. MA Neu- und Ausbau	jährl. MA Inst.	kum. MA Inst.
mineralische Rohstoffe	Kies/Sand	1,18	734.897	867.178	11.449	13.510		0
	Kalksandstein	1,28	3.571	4.571	4	5		0
	Beton	1,33	326.765	434.597	3.202	4.259	561	746
	Kanalklinker**	2,11	19.631	41.421		0		0
	Zementmörtel**	1,40	5.459	7.643	9	13	2	3
	Glaswolle	4,66	89	415		0		0
	Steinzeug	2,88	18.483	53.231	327	942	77	222
	Flachglas	2,95	7	21		0		0
metallische Rohstoffe	Guss-/ Roheisen	7,34	347	2.648	7	53	1	8
	Stahl	1,47	7.707	11.329	36	53	5	7
	Stahl V4A	17,94	27	484		0		0
	Kupfer	179,07	81	14.505		0		0
	Aluminium	18,98	18	342		0		0
Kunststoffe / Sonstige	PELD	2,49		0	1	2		0
	PEHD	2,52	349	879	37	93	20	50
	PVC-U	3,47	371	1.287	32	111	19	66
Summe gesamt			1.117.802	1.440.552	15.104	19.041	685	1.102

Quelle: Eigene Berechnungen auf Basis von Wuppertal Institut 2003, **= MIT-Koeffizient geschätzt

Hier wurde für den Zementmörtel ein etwas geringerer MIT-Wert von 1,4 ermittelt, da der Zementmörtel in den gemauerten Schächten und Kanälen in der Regel aus vier Teilen Sand und einem Teil Zement besteht. Da insbesondere für die Kläranlagen keine Differenzierung der eingesetzten Stähle vorlag, wurde der geringere MIT-Koeffizient für die Elektrolichtbogenroute gewählt. Für Kupfer und Aluminium wurden jeweils die Werte für den Produktionsmix zugrunde gelegt. Des Weiteren lagen keine Differenzierungen nach der Art der Kunststoffe insbesondere in der Kanalisation

vor. Hier wurde auf der Grundlage von Frank et al. (2006) ein Verhältnis von 1:1 von PEHD und PVC-U angesetzt.

Insgesamt erhöhen die indirekten Ressourcenflüsse den Gesamtaufwand im Vergleich zu den direkten Materialflüssen im Bestand und für Neubau und Erweiterung um ein Drittel, für Erneuerung und Instandhaltung um knapp zwei Drittel, bedingt insbesondere durch den Einbau von Steinzeug- und Kunststoffrohren.

4.4 Zusammenfassung Wasserinfrastruktur

Für die Ermittlung der Materialbestände und jährlichen Materialflüsse konnte zum Teil auf bestehende Materialkoeffizienten aus anderen Untersuchungen zurückgegriffen werden, welche teilweise im Hinblick auf die deutschen Verhältnisse modifiziert wurden. Ergänzt wurden diese Daten um umfangreiche Recherchen in technischen Regelwerken, Produkthandbüchern, Fachliteratur und Expertengesprächen. Damit konnte insgesamt in den meisten Fällen eine belastbare Datengrundlage geschaffen werden. Jedoch konnten gerade die jährlichen Flüsse für Erneuerung und Instandhaltung häufig nicht belastbar ermittelt werden. Damit ist eine Vergleichbarkeit der ermittelten jährlichen Flüsse gerade mit anderen Infrastruktursystemen schwierig.

Bezüglich der in der Wasser- und Abwasserinfrastruktur gebundenen Materialien ist auch hier die herausragende Bedeutung der mineralischen Baustoffe hervorzuheben, welche knapp 99 % der insgesamt knapp 1,8 Mrd. Tonnen Baustoffe ausmachen. Dies liegt vorwiegend an der Rohrbettung der Leitungsnetze. Auch Beton (und hier vorwiegend Stahlbeton) spielt mit knapp 500 Mio. Tonnen bei der Konstruktion vieler Anlagen der Wasser- und Abwasserinfrastruktur eine große Rolle. Im Gegensatz dazu spielen Metalle (rund 20 Mio. Tonnen, davon überwiegend Stahl und Eisen) und Kunststoffe (< 2 Mio. Tonnen) nur eine untergeordnete Rolle. Als Hauptwerkstoffe im Leitungsbau sind sie zudem meist unterirdisch verbaut und damit schlecht zugänglich.

Tab. 97 gibt einen Überblick über die in Wasserinfrastrukturen gebundenen Materialmengen:

Tab. 97: Übersicht Materialbestand der Wasser- und Abwasserinfrastrukturen

in 1.000 t		Wasser	Abwasser	Gesamt
mineralische Rohstoffe	Kies/Sand	423.642	734.897	1.158.539
	Quarzsand	893		893
	Naturstein	55.458		55.458
	Kalksandstein		3.571	3.571
	gesch. Vermiculit	62		62
	Beton	148.747	326.765	475.512
	Kanalklinker		19.631	19.631
	Ziegel	577		577
	Faserzement	1.106		1.106
	Zementmörtel	688	5.459	6.147
	Steinzeug		18.483	18.483
	Flachglas		7	7
	Glaswolle		89	89
metallische Rohstoffe	Guss-/ Roheisen	8.215	347	8.562
	Stahl	3.781	7.734	11.515
	Kupfer	12	81	93
	Zink	13		13
	Aluminium		18	18
Kunststoffe / Sonstige	PVC / PE	934	720	1.654
Summe mineralische Rohstoffe		631.173	1.108.902	1.740.075
Summe metallische Rohstoffe		12.021	8.180	20.201
Summe Kunststoffe / sonstige		934	720	1.654
Summe gesamt		644.128	1.117.802	1.761.930

Quelle: Eigene Berechnungen, Details in den vorangegangenen Tabellen

Die Veränderung des aktuellen Materialbestandes (Tab. 98) resultiert im Wesentlichen aus Neubau- bzw. Rückbauaktivitäten und zu einem geringeren Maße aus unterschiedlichen Sanierungsverfahren.⁵⁷ Angesichts der lückenhaften Datengrundlagen sind die ermittelten jährlichen Materialflüsse mit etwa 1 % des Gesamtmaterialbestandes wahrscheinlich unterschätzt. Dies gilt insbesondere für durch Instandhaltung induzierte Materialflüsse. Durch den Einsatz neuer Materialien (verstärkte Verwendung von Kunststoff) liegt der Materialinput bei Erneuerungs-Aktivitäten im Kanal- und Leitungsnetz sogar unter dem Material-Output. Bei der Interpretation der Ergebnisse ist zu berücksichtigen, dass eine Annäherung an tatsächliche Erneuerungsraten (statt erforderlicher Erneuerungsraten) die Grundlage für die Berechnungen stellt. Gerade im Bereich der Wasser- und Abwasserinfrastruktur wird der Investitionsbedarf in die Instandhaltung als sehr hoch eingeschätzt, was steigende jährliche Materialflüsse nach sich ziehen würde. Die Angaben über den Investitionsbedarf schwanken allerdings stark. Während Kluge et al. (2003) von 150 bis 250 Mrd. Euro sprechen, kommen Rei-

⁵⁷ In der Sanierung unterscheiden wir Reparatur, Instandhaltung und Erneuerung.

denbach et al. (2008) nur auf einen kommunalen Investitionsbedarf von 65 Mrd. Euro für Ersatzinvestitionen im Wasser- und Abwasserbereich.

Tab. 98: Jährliche Flüsse der Wasser- und Abwasserinfrastrukturen

		Neubau / Erweiterung			Gesamt Neubau	Erneuerung / Instandhaltung				Gesamt Inst.
		Wa In	Abw In Out			Wa In Out		Abw In Out		
in 1.000t										
mineralische Rohstoffe	Kies/Sand	1.525	11.449		12.974					0
	Quarzsand				0					0
	Naturstein	144			144					0
	Kalksandstein		4	21	4					0
	gesch. Vermiculit				0					0
	Beton	73	3.202	612	3.275		6	561	650	561
	Kanalklinker				0				88	0
	Ziegel				0					0
	Faserzement				0		12			0
	Zementmörtel	5	9		14	32	7	2	24	34
	Steinzeug		327		327			77	83	77
	Flachglas				0					0
	Glaswolle				0					0
metallische Rohstoffe	Guss-/ Roheisen	13	7		20	24	80	1	1	25
	Stahl	11	36	28	47	42	16	5		47
	Kupfer				0					0
	Zink				0					0
	Aluminium				0					0
Kunststoffe	PVC / PE	5	70		75	12	7	39	2	51
Summe mineralische Rohstoffe		1.747	14.991	633	16.738	32	25	640	845	672
Summe metallische Rohstoffe		24	43	28	67	66	96	6	1	72
Summe Kunststoffe / sonstige		5	70	0	75	12	7	39	2	51
Summe gesamt		1.776	15.104	661	16.880	110	128	685	848	795

Quelle: Eigene Berechnungen

5 Energieinfrastruktur

Der Bereich Energieinfrastrukturen teilt sich auf in Infrastrukturen zur Erzeugung von Energie und zu deren Verteilung. Als Verteilnetze werden in dieser Studie die Strom-, Gas- und Wärmenetze betrachtet. Energieerzeugungsinfrastrukturen sind in erster Linie Stromerzeugungsinfrastrukturen. Auf Grund ihrer relativ geringen Bedeutung werden die norddeutschen Einrichtungen zur Förderung und Aufbereitung von Erdgas nicht mit in die Untersuchung aufgenommen. Weiterhin können Energieerzeugungseinrichtungen danach unterschieden werden, ob sie Energie aus erneuerbaren oder nicht erneuerbaren Energiequellen erzeugen. Für Infrastrukturen, die auf nichterneuerbaren Energiequellen basieren, werden für die Abschätzungen der gespeicherten Materialmengen im Bestand und der jährlichen Materialflüsse für Ausbau, Erneuerung und Instandhaltung a) konventionelle Kraftwerke mit fossilen Energiequellen und b) Kernkraftwerke untersucht. Für erneuerbare Energiequellen werden Wasserkraft-, Windkraft- und Biogasanlagen in die Abschätzung der Materialbedarfe und jährlichen Materialflüsse einbezogen. Photovoltaik, Geothermie und andere Anlagen mit erneuerbaren Energiequellen werden auf Grund ihrer geringen Bedeutung für die deutsche Energieerzeugung nicht mit untersucht.

Die Infrastrukturbestandteile unterscheiden sich dabei deutlich hinsichtlich ihrer Wachstumsdynamik, ihrer Altersstruktur und der zur Abschätzung notwendigen Datengrundlage. Während erneuerbare Energiesysteme wie Biogas und Windkraft in ihren jährlichen Flüssen stark durch Neubau und Erweiterung bestimmt sind, sind konventionelle Kraftwerke durch unregelmäßige Modernisierung oder Stilllegung (Kernkraftwerke) oder auf Grund ihrer Altersstruktur gerade am Anfang eines neuen Investitionszyklus stehend geprägt. Die Neubauten konventioneller Kraftwerke und Freileitungen sind zudem mehrjährige Bauprojekte, die durch langfristige Genehmigungsverfahren und lokale Widerstände mitunter jahrelanger Verzögerung unterliegen. Für das Leitungsnetz werden zwar höhere regelmäßige Aufwendungen für Erneuerung und Instandhaltung erwartet. Es liegen jedoch nur sehr wenige Daten vor, die eine konkrete Abschätzung der unterschiedlichen Investitionsmaßnahmen und ihrer stofflichen Ausprägung ermöglichen. Zumeist liegen nur monetäre Investitionszahlen vor, die unter bestimmten Annahmen (siehe weiter unten im Text) als Grundlage einer vorläufigen Abschätzung verwendet wurden.

Der geringe Zuwachs der Fern- und Nahwärmenetze, die generell sehr schlechte Datenlage in diesem Bereich und fehlende grundlegende Informationen wie Investitionen oder Aufwendungen für Instandhaltung führen dazu, dass für die Wärmenetze keine jährlichen Flüsse für Ausbau, Erneuerung und Instandhaltung abgeschätzt werden.

Aufgrund der umfangreicheren und belastbareren Datenlage wird zunächst die Infrastruktur der Energienetze und anschließend die der Energieerzeugung dargestellt.

5.1 Energieverteilung

5.1.1 Elektrizitätsnetz

Laut Bundesnetzagentur (BNA) (2009) hatte das Stromnetz in Deutschland im Jahr 2008 eine Gesamtlänge von 1,72 Mio. km. Davon waren 1,11 Mio. km Niederspannungs- (NS), 499.000 km Mittelspannungs- (MS) und 113.000 km Hochspannungsnetz (HS). Nach verschiedenen Veröffentlichungen ist der Kabelanteil im Hochspannungsbereich etwas über 5.000 km lang. Laut Steinbrich (2005) betrug der Kabelanteil im MS- und NS-Netz insgesamt für das Jahr 2002 71 %, davon 65 % im Bereich MS und 81 % im Bereich NS. Durch Übertragen dieser Verhältnisse auf die Daten des Jahres 2008 konnten die Anteile an Freileitung bzw. Kabel an den verschiedenen Netzebenen in Deutschland abgeschätzt werden. Diese Daten unterscheiden sich von den Schweizer Netzdaten in Frischknecht et al. (2007), deren Anteil an Freileitung im MS-Bereich deutlich höher liegt.

Tab. 99: Stromnetz in Deutschland im Jahr 2008

	Kabel in km	Freileitungen in km	Kabel in %	Freileitungen in %	Netz insgesamt
Niederspannung	888.046	222.011	80,00	20,00	1.110.057
Mittelspannung	344.541	154.794	69,00	31,00	499.335
Hochspannung	5.000	70.000	6,50	91,03	76.900
Höchstspannung	100	40.000	0,28	113,02	35.391
Total Höchstspannung	5.100	110.000	4,54	97,96	112.291
Insgesamt	1.237.687	486.805	71,89	28,27	1.721.683

Quelle: Eigene Berechnung auf Grundlagen von BNA (2004) und Steinbrich (2005)

5.1.1.1 Die Netzstruktur des deutschen Stromnetzes

Höchstspannungsnetz

Das Höchstspannungsnetz in Deutschland umfasst 35.391 km Stromkreislänge (VDN 2007). Es wird von den vier Betreibern Transpower (ehemals E.ON), EnBW, Amprion (ehemals RWE) und 50Hertz Transmission (ehemals Vattenfall) betrieben. Zum Höchstspannungsnetz zählen sowohl die 380 kV- als auch die 220 kV-Leitungen. Die 220 kV-Leitungen werden mittlerweile häufig zu 380 kV-Leitungen ausgebaut. Neben Freileitungen gibt es in einigen Großstädten Deutschlands noch zusammen rund 100 km Erdkabel im Höchstspannungsnetz.

In der Regel werden auf einer Höchstspannungsleitung zwei Drehstromkreise pro Mast geführt, mitunter auch bis zu 6 Stromkreise pro Freileitungsstrecke. Zu jedem Stromkreis gehören drei Phasen, die im Spannungsbereich 380 kV als 3er oder 4er Bündel mit Aluminium/Stahl (Al/St)-Verbundseil geführt werden. 220 kV-Freileitungen werden häufig als 2er Bündel geführt. Zur Bestimmung der Anzahl der Masten findet man in der Literatur verschiedene Angaben. Die Spannweite im Höchstspannungsnetz wird je nach Masthöhe und Spannungsebene im Höchst- und Hochspannungsnetz mit 300 bis 450 m angegeben (Oswald 2005). Auch bei den Masten ist zwischen verschiedenen Funktionstypen zu unterscheiden. Es gibt vor allem Tragmasten und Abspannmasten, aber auch noch End- und Abzweigmas-

te. Jeder fünfte bis fünfzehnte Mast ist ein Abspannmast (Oswald 2005) und dieser ist um etwa 40 % schwerer als ein Tragmast (Tryfonidou, 2006). Die häufigste in Deutschland anzutreffende Mastart ist der Donaumast: Die Mastart verteilt die Leitungen über zwei Ebenen, um eine geringere Trassenbreite zu erwirken.

Neben dem Mast gibt es als weitere Bauteile Isolatoren und ein Erdseil. Die Isolatoren im Höchstspannungsnetz sind Langstabilisatoren aus Porzellan, Ketten aus Glas oder Porzellankappe. 220 kV-Netze sind häufig durch zwei Langstabilisatoren und das 380 kV-Netz durch drei Langstabilisatoren gekennzeichnet. Das Erdseil, welches als Blitzableiter dient, ist wie die Leitungen selbst ein Al/St-Verbundseil und weist einen ähnlichen Querschnitt auf. Des Weiteren steht der Mast auf einem Betonfundament, das zumeist als ein so genanntes Stufenfundament ausgeführt wurde.

Das Kabelnetz im Höchstspannungsnetz umfasst 100 km und ist vornehmlich an den Orten zu finden, an denen Freileitungen baulich schwierig umzusetzen sind, z.B. in Innenstädten. Kabeltrassen in diesem Spannungsbereich gelten als zu aufwändig und teuer und sind daher nur in Ausnahmefällen vorzufinden. Darüber hinaus ist die Wärmeentwicklung bei Erdkabeln problematisch. Neben dem eigentlichen Kabel müssen hier immer wieder Verbindungsmuffen gesetzt werden, da aufgrund der Stärke des Kabels nur eine bestimmte Kabellänge am Stück transportiert werden kann. Teilweise werden Kabel in begehbaren Kanälen unter der Erde verlegt (z.B. in Berlin), wofür ein hoher stofflicher Aufwand erforderlich ist.

Hochspannungsnetz

Das Hochspannungsnetz (HS-Netz) umfasst alle Leitungen und Kabel im Bereich 60 kV bis 220 kV. In Deutschland hat das Hochspannungsnetz eine Länge von 76.900 Stromkreiskilometern. Es umfasst sowohl Freileitungen als auch Kabelnetze. Überwiegend findet man aber auch in dieser Spannungsebene Freileitungen. Der Aufbau der Freileitungen im Hochspannungsnetz ist vergleichbar mit der des Höchstspannungsnetzes. Allerdings sind die Masten im 110 kV-Netz deutlich kleiner als im Bereich der Höchstspannung. Zusätzlich bestehen 110 kV-Freileitungen zumeist nur aus einem Al/St-Seil und nicht aus Bündeln.

Mittelspannungs- und Niederspannungsnetz

Das Mittelspannungsnetz (MS-Netz) in Deutschland hat eine Gesamtlänge von 499.335 km. Es umfasst die Spannungsstufen von 0,5 kV bis unter 60 kV und dient zur ländlichen und städtischen Verteilung und zum Anschluss von Unternehmen mit hohem Strombedarf. Weiterhin werden auch Windenergieanlage zum Teil über MS-Leitungen an das Netz angeschlossen. Es kann sowohl als Freileitung als auch in Kabelbauweise verlegt sein. Die genaue Verteilung zwischen Freileitung und Kabel hängt zum Teil von regionalen und topographischen Gegebenheiten ab. Wir schätzen den Anteil an Freileitungen im MS-Netz auf 31 % (Tab. 99).

Das Niederspannungsnetz mit einer Spannungsebene $<0,5$ kV weist die größte Netzlänge in Deutschland auf: die 1.110.057 km NS-Leitungen sind zu großen Teilen als Kabelleitungen ausgeführt. Im ländlichen Bereich kann es aber immer noch NS-Kabel in Form von Freileitungen an Holz- oder Betonmasten geben. In unseren Abschätzungen zum Materialbedarf im NS-Netz gehen wir von 20 % Freileitungen aus. In den nächsten Jahren wird dieser Anteil vermutlich weiter sinken.

5.1.1.2 Materialbestand der Stromnetze

Von Frischknecht et al. (2007) wurde der spezifische Materialverbrauch für Kabelleitungen zu großen Teilen übernommen (Tab. 100). Allerdings gehen Frischknecht et al. davon aus, dass alle Erdkabel zu 100 % aus Kupferleitern bestehen. Es liegen zwar keine genauen Zahlen über den Anteil von Aluminiumkabeln im NS- und MS-Netz vor. Nach Konsultation von Experten bei verschiedenen Netzbetreibern wird in dieser Studie im NS-Netz mit einem Anteil von 65 % Aluminium-Leitern und 35 % Kupfer-Leitern, sowie im Kabelnetz des MS-Netzes mit einem Anteil von 20 % Aluminiumleiter und 80 % Kupferleiter gerechnet. Hochspannungskabel sind dagegen zu 100 % aus Kupfer-Leitern gefertigt. Weiterhin wurde der Kupferbedarf pro km NS-Netz von 1,5 auf 2,2 t/km erhöht.⁵⁸ Da NS-Kabel häufig 4-adrig geführt werden, ist der Kupferanteil pro km laut Herstellerangaben (z.B. Helukabel) mit 1.350 bis 5.760 kg/km je nach Leiterdurchmesser deutlich höher als bei Frischknecht et al. (2007) angegeben. Für MS- und HS-Kabel ist zu beachten, dass jede Phase als eigenes Kabel verlegt wird, so dass pro Stromkreis drei Kabel notwendig sind.

Erdkabel werden, um Schäden zu vermeiden, in der Regel in ein Sandbett verlegt. Für die Abschätzung des Bedarfs an Sand wird im NS-Netz ein Sandbett mit 35 cm Höhe und Breite angenommen. Dies ergibt rund 0,123 m³ pro Meter Kabellänge, multipliziert mit einem Schüttgewicht von 1.900 kg/m³ ergibt dies 235 kg/m. Ausgehend von diesem Wert wurde der spezifische Materialkoeffizient für die Sandbettung im MS-Netz auf 300 kg/m und im HS-Netz auf 600 kg/m hochgerechnet.

Tab. 100: Spezifischer Materialbedarf Erdkabel in t/km

	NS-Netz	MS-Netz	HS-Netz
	35 % Haftmasse- und 65 % Kunststoffkabel	80 % Haftmasse- und 20 % Kunststoffkabel	50 % Haftmasse-, 40 % Kunststoff- und 10 % Gaskabel
	t/km	t/km	t/km
Kupfer	2,2	2	6,8
Aluminium	1,7	0,4	
Isolieröl/Haftmasse	0,1	0,15	1
PVC	0,9	0,6	1
PE	0,1	0,6	1
Stahlblech	0,1	0,1	
Stahlrohr*	0,3	1	2
Blei	0,3	0,8	2
Sand	235	300	600

Quelle: Überwiegend Frischknecht et al. (2007), Sand sowie Materialbedarf für Kupfer im NS-Netz: eigene Abschätzung. *Annahme: 80 % der Kabel sind erdverlegt, 20 % stahlrohrverlegt

Für Freileitungen wird zu großen Teilen ebenfalls der spezifische Materialbedarf aus Frischknecht et al. (2007) genutzt. Allerdings wird davon ausgegangen, dass ein Teil der Freileitungen nicht mehr blank geführt wird, sondern häufig als Kabel am Mast angebracht ist. Es wird daher für 30 % der Freileitungen im NS- und MS-Netz ein Materialbedarf für PE-Mantel angenommen. Zusätzlich wird angenommen, dass auch im NS-Freileitungsnetz der Aluminiumanteil höher ist als bei Frischknecht et al. (2007). Analog zum MS-Netz wird für das NS-

⁵⁸ Als typisches NS-Kabel mit Kupferleiter wird ein NYCWY-J 0,6/1kV 4x50 sm/25 verwendet, für Kabel mit Aluminiumleiter werden die Werte eines NS NAYY-J 4X150 se verwendet.

Netz der Materialbedarf mit einer 50/50-Verteilung zwischen Kupfer- und Aluminiumleiter hoch gerechnet.

Tab. 101: Spezifischer Materialbedarf Freileitungsdraht

	Annahme	Leiterlänge in km	Kupfer in t/km	Al-Legierung in t/km	Stahl in t/km	PE in t/km
NS	50 % Kupfer und 50 % Al-Leiter	888.046	0,5	0,193		0,1
MS	50 % Kupfer und 50 % Al/St-Leiter	464.382	1,5	0,260	0,123	0,1
HS	100 % Al/St-Leiter)	780.000		0,727	0,271	
Erdungsleiter HS-Mast	100 % Al/St-Leiter)	55.000		0,727	0,271	

Quelle: Eigene Berechnung bzw. Frischknecht et al. (2007)

Die enormen Leiterlängen ergeben sich aus der Multiplikation der Stromkreis-Kilometer mit Annahmen bezüglich der Leiter pro Stromkreis bzw. Bündelungen. Für NS-Freileitungen werden vier Leiter pro Stromkreis und für MS- und HS-Freileitungen drei Leiter pro Stromkreis verwendet. Für den Materialbedarf des HS-Leiters wird ein Al/St-Seil mit der Konfiguration AL/St-Seil 265/35 angenommen (Aluminium-Durchmesser 265 mm und Stahl-Durchmesser 35 mm). Für 110 kV- und 220 kV-Freileitungen wird eine Zweier-Bündelung unterstellt, bei 380 kV-Freileitungen eine 4er-Bündelung. Im Jahr 2000 bestand das Höchstspannungsnetz zu rund der Hälfte jeweils aus 220 kV- und 380 kV-Freileitungen. Es werden also 20.000 km als 380 kV- und 20.000 km als 220 kV-Netz gerechnet. Für MS-Freileitungen wird ein typisches Aluminium/Stahl-Seil mit den Maßen 95/15 angenommen, bzw. ein Kupfer-Seil mit 100 mm Durchmesser. Für NS-Freileitungen wird ein Al-Seil mit 70 mm Durchmesser bzw. ein Kupfer-Seil mit 35 mm Durchmesser zur Berechnung des Materialbedarfs verwendet.

Angaben zur Verteilung von Mastarten nach Materialgruppe liegen nicht vor. Die schweizerischen Daten von Frischknecht et al. (2007) mit ihrem hohen Anteil an Holzmasten können nicht auf Deutschland übertragen werden, da der hohe Holzanteil topographisch begründet ist.⁵⁹ Die Abschätzung des Materialbedarfs für Freileitungsmasten wurde über die Spannweite der einzelnen Mastkategorien je Netzebene, das Gewicht der einzelnen Mastarten sowie über Annahmen hinsichtlich der Verteilung einzelner Bauweise vorgenommen. Zunächst wurde über die Spannbreite die Anzahl der Masten pro km Freileitungsstrecke abgeschätzt (Tab. 102).

⁵⁹ In bergigen Regionen wie der Schweiz werden zum einen mehr Freileitungen verwendet als in Deutschland und zum anderen werden in topographisch anspruchsvollen Regionen mehr Holzmaste im NS- und MS-Netz verwendet, da dieser einfacher zu erstellen sind.

Tab. 102: Dimensionierung und Anzahl an Freileitungsmasten

		Masthöhe in m	Spannbreite in m	Masten pro km
HS (Stahlfachwerk)	380 kV	70	450	2
	220 kV	45	350	3
	110 kV	35	250	4
MS+NS	Beton	10-20	150	7
	Holz	10-20	60	17
	Stahlrohr	10-20	150	7

Quelle: Eigene Berechnung

In einem weiteren Schritt wurden die Massen der einzelnen Mastarten pro Spannungsebene ermittelt. Dazu wurden Herstellerangaben (persönliche Kommunikation mit Euro poles und Wiegel Parey Productions) verwendet. Aus der Anzahl der Masten pro km und dem Gewicht pro Mast kann der spezifische Materialkoeffizient für einen km Freileitungsmasten ermittelt werden. Freileitungsmasten im Hochspannungsnetz sind über Betonfundamente im Boden verankert. Es wird üblicherweise ein unbewehrtes Stufenfundamente verwendet, bei dem jeder Fuß des Stahlfachmastes einzeln durch ein Fundament gesichert ist. Nur in Ausnahmen kommen Plattenfundamente oder Pfahlfundamente mit Stahlbewehrung zum Einsatz. In der Dissertation von Tryfonidou (2006) wird für einen 380 kV-Freileitungsmast ein Fundament mit 60 m³ Beton angegeben. Dies wäre je 380 kV-Mast eine Betonmenge von 144 Tonnen. Ravenmark/Normark (2005) geben für das Betonfundament eines Hochspannungsmasts sogar einen Wert von 376 Tonnen an. Diese Werte scheinen für die Mehrzahl der Freileitungsmasten deutlich zu hoch. Nach eigenen Abschätzungen hat jedes Stufenfundament einen Durchmesser von ca. 1,50 m und eine Tiefe von 4 m. Dafür würden pro Fundament ca. 7 m³ Beton benötigt, an allen vier Mastfüßen zusammen also 28 m³. Berücksichtigt man ein Betongewicht von 2.400 kg/m³, ergibt sich ein Gesamtgewicht eines Mastfundaments von rund 67,2 Tonnen. Wir haben den Wert für die Abschätzung auf 70 Tonnen aufgerundet.

Tab. 103: Gewicht pro Freileitungsmast

		Masthöhe in m	Mastgewicht in t
HS (Stahlfachwerk)	380 kV	70	15
	220 kV	45	10
	110 kV	35	5
MS	Beton	20	3
	Holz	20	0,5
	Stahlrohr	20	4
NS	Beton	12	1,5
	Holz	12	0,24
	Stahlrohr	12	0,8
Fundament (in t)			70

Quelle: Eigene Berechnung zum Teil basierend auf Herstellerangaben

Im MS-Netz wird von einer Verteilung von 20 % Beton-, 20 % Holz- und 60 % Stahlrohrmasten ausgegangen. Im NS-Netz lautet die Annahme: 40 % Beton-, 40 % Holz- und 20 % Stahlrohrmasten. Hochspannungs-Freileitungen werden komplett an Stahlgittermasten montiert. Zudem sind an HS-Masten meist zwei bis drei Stromkreise gleichzeitig je Freileitungstrecke installiert. Für die Abschätzung des Materialbedarfs wird daher mit jeweils zwei

Stromkreisen pro Freileitungsstrecke HS-Netz gerechnet. Die Daten für die Betonfundamente sind unterschätzt, da nur Fundamente für Hochspannungsmasten eingerechnet wurden und keine Angaben über die Betonmengen bei NS- und MS-Freileitungen vorliegen.

Tab. 104: Materialbedarf für den Bestand an Freileitungsmasten

	Mastart	Gewicht pro Mast in t	Freileitungslänge in km	Anzahl Masten pro km	Anzahl der hochgerechneten Masten Stück	gesamter Materialbedarf in t
HS	Stahl-Fachwerk	10	110.000	3	165.000	1.650.000
MS	Beton	3	30.959	7	216.711	650.134
	Holz	0,5	30.959	17	526.299	263.150
	Stahlrohr	4	92.876	7	650.134	2.600.537
NS	Beton	1,5	88.805	7	621.632	932.448
	Holz	0,24	88.805	17	1.509.678	362.323
	Stahlrohr	0,8	44.402	7	310.816	248.653
Betonfundament (nur Stahl-Fachwerk im HS)		70			165.000	11.550.000
Summe					4.309.858	

Quelle: Eigene Berechnungen zum Teil basierend auf Herstellerangaben

Schließlich wurde noch der Materialbedarf für die rund 560.000 Transformatoren hochgerechnet. Für die Studie werden die Werte aus Frischknecht et al. (2007) verwendet und auf die Anzahl der deutschen Transformatoren angewandt. Weitere Bereiche wie z.B. der Materialbedarf für gasisolierte Schaltanlagen oder der Gebäudeaufwand für Transformatoren, Verteil- und Schaltanlagen wurden nicht abgeschätzt. Überschlägige Zahlen zum Schweizer Netz finden sich dazu bei Frischknecht et al. (2007).

Tab. 105: Spezifischer Materialbedarf Transformatoren

	Anzahl an Transformatoren	Öl pro Anlage und total in t	Kupfer pro Anlage und Total in t	Stahl pro Anlage und Total in t	Stahlblech pro Anlage und Total in t
Leistung < 2,5 MVA	557.700	1	0,6	1,5	0,8
Gesamt NS-Netz		557.700	334.620	836.550	446.160
Leistung 2,5 - 50 MVA	7.500	10	6	15	9
Leistung > 50 MVA	1.100	20	15	30	20
Gesamt MS-Netz		97.000	61.500	145.500	89.500

Quelle: Eigene Berechnung auf Grundlage von Frischknecht et al. (2007)

Der gesamte Materialbestand im Bereich Stromnetz kann Tab. 106 entnommen werden.

Tab. 106: Materialbestand Stromnetz

		NS in 1.000 t	MS in 1.000 t	HS in 1.000 t	Insgesamt in 1.000 t
Kabel	Kupfer	684	1.654	104	2.442
	Aluminium	981	83		1.064
	Isolieröl/Haftmasse	89	155	15	259
	PVC	799	620	15	1.435
	PE	89	620	15	724
	Stahlblech	89	103		192
	Stahlrohr	53	276	31	360
	Blei	266	827	31	1.124
	Sand	166.953	82.690	2.448	252.090
Freileitungen	Kupfer	222	348		570
	Aluminium	86	60	607	753
	Stahl		29	226	255
	PE	27	14		41
Freileitungsmasten	Stahl-Fachwerk			1.650	1.650
	Stahlrohr	249	2.601		2.849
	Beton	932	932		1.865
	Holz	362	362		725
Fundament	Beton			11.550	11.550
Transformatoren	paraffinbasierte Mineralöl bzw. Silikonöl				
	Kupfer	558	97		655
	Stahl	335	62		396
	Stahlblech	837	146		982
		446	90		536

Quelle: Eigene Berechnung

5.1.1.3 Jährlicher Materialbedarf für Ausbau und Erneuerung des Stromnetzes

Die Datensituation zum Zustand des Stromnetzes sowie zu Ausbau bzw. Instandsetzungsmaßnahmen ist unzureichend. Die wenigen belastbaren Daten, die vorhanden sind, beziehen sich auf den Anstieg der Netzlängen sowie die Investitionen in das Stromnetz. So belaufen sich die Investitionen der Stromwirtschaft in das Stromnetz laut BDEW (2008b) im Zeitraum 1999 bis 2007 auf durchschnittlich 2,38 Mrd. Euro pro Jahr. Die Bundesnetzagentur kommt in ihrem Monitoringbericht von 2009 auf Investitionszahlen für Neubau/Ausbau/Erweiterung sowie Erhalt/Erneuerung für 2007 von 2,63 Mrd. Euro und für 2008 auf 3,134 Mrd. Euro. Diese Zahlen decken die vier großen überregionalen Netzbetreiber (ÜNB) und 691 der 862 registrierten Verteilernetzbetreiber (VNB)⁶⁰ ab. Zusätzlich wurden von den ÜNBs und den VNBs rund 3,36 Mrd. Euro (2007) bzw. 3,43 Mrd. Euro (2008) an Aufwendungen in die drei Kategorien Neubau/Ausbau/Erweiterung, Erhalt/Erneuerung und Wartung/Instandhaltung der Stromnetze investiert (Tab. 108).

⁶⁰ Von 862 Verteilernetzbetreibern haben sich 691 am Monitoring beteiligt. Die beteiligten Unternehmen decken 97 % des Marktes ab.

Tab. 107: Investitionen der Netzbetreiber in das Stromnetz 2007 und 2008

	2007					2008				
	Investitionen		Aufwendungen			Investitionen		Aufwendungen		
in Mio. Euro	Neubau Ausbau Erweiter- ung	Erhalt Erneuer- ung	Neubau Ausbau Erweiter- ung	Erhalt Erneuer- ung	Wartung Instand- haltung	Neubau Ausbau Erweiter- ung	Erhalt Erneuer- ung	Neubau Ausbau Erweiter- ung	Erhalt Erneuer- ung	Wartung Instand- haltung
ÜNB*	398	105	39	93	248	595	146	6	74	173
VNB*	1.179	948	202	1.101	1.678	1.260	1.133	177	1.093	1.911

Quelle: Eigene Berechnungen; *ÜNB: Überegonale Netzbetreiber, VNB: Verteilernetzbetreiber

Es liegen keine Angaben über die Art der Investitionen vor. Es kann jedoch davon ausgegangen werden, dass das Hochspannungsnetz (HS-Netz) immer noch als Freileitungssystem ausgebaut wird. Allerdings gibt es Bestrebungen der Politik, lokaler Initiativen sowie betroffener Gemeinden, die Netzbetreiber zu motivieren, zumindest im 110 kV-Bereich Erdkabel einzusetzen. Dies wird von Netzbetreibern mit dem Hinweis auf deutlich höhere Investitionskosten in der Regel abgelehnt. Aus diesem Grund wird hier davon ausgegangen, dass Investitionen im Hochspannungs-Netz ausschließlich in Form von Freileitungen erfolgt sind. Weiterhin wird angenommen, dass Investitionen in Erneuerungen und Erhalt in der Regel mit einem Komplettaustausch der Masten und Leiterseile verbunden sind. So werden z.B. vermehrt 220 kV-Freileitungen durch 380 kV-Leitungen ersetzt und die alten Trassen in diesem Kontext komplett erneuert. Zudem sind als Folge der Mastbrüche im Winter 2005 alle Netzbetreiber von der Bundesnetzagentur (BNA) aufgefordert worden, bis 2015 alle alten Masten aus so genanntem Thomasstahl auszuwechseln, da eine Materialermüdung als Mitursache der Mastbrüche nicht ausgeschlossen werden kann (BNA 2006). Im Bereich des Netzbetreibers Amprion (ehemals RWE Transportnetz) sollen im Jahr 2005 von 42.000 Masten immerhin zwei Drittel aus Thomasstahl bestanden haben. Die drei anderen ÜNB sind davon offenbar weniger betroffen.

Der Abschätzung liegt die Annahme zugrunde, dass die Zuwächse des Hoch- und Höchstspannungsnetzes überwiegend durch die vier ÜNBs erfolgten. Die Investitionen der VNBs wurden jeweils anteilig der Netzlängen der einzelnen Ebenen der VNB-Netze verteilt. Danach werden 3 % der Investitionen der VNBs in HS-Netzen, 28 % in den Mittelspannungs-Netzen (MS-Netz) und 69 % in den Niederspannungs-Netzen (NS-Netz) getätigt. Weiterhin erfolgen alle Investitionen im HS-Netz als Freileitungen. Im Bereich des MS-Netzes wird geschätzt, dass Investitionen in den Neubau zu 75 % als Erdkabel ausgeführt werden. Investitionen in den Erhalt und die Erneuerung des MS-Netzes betreffen aufgrund des höheren Wartungsaufwandes wiederum vermehrt Freileitungstrassen. Es wird angenommen, dass die Hälfte der erneuerten Trassen in diesem Zusammenhang von Freileitung auf Erdkabel umgestellt wird. Die Investitionen im Bereich der NS-Netze erfolgen nach unserer Schätzung komplett als Erdverkabelung, sowohl hinsichtlich des Aus- und Neubaus als auch der Erneuerung- und Erhaltungsinvestitionen.

Aus den Zuwachsraten der Netzlängen und den Investitionen in Neu- und Ausbau können für jede Netzebene durchschnittliche Kosten pro km abgeleitet werden. Unter der Annahme, dass Erneuerungs- und Erhaltungsinvestitionen ähnliche Kostenrelationen aufweisen, kann so die Länge der erneuerten Netzlängen ermittelt werden. Die Aufwendungen für Wartung

und Instandsetzung werden hier nicht weiter verfolgt, da unklar ist, wie hoch der eigentliche Anteil für Ersatzmaterialien (z.B. Korrosionsfarbe der Freileitungsmaste) an diesen Aufwendungen ist. In ihrer Größenordnung sollten diese Materialflüsse im Vergleich zu den Materialflüssen durch Neu- und Ausbau sowie Erneuerung und Erhalt zudem eine geringe Bedeutung haben.

Die Netzlängen wurden mit zwei verschiedenen Datensätzen abgeschätzt, die sich allerdings zum Teil deutlich unterscheiden. Mit der ersten Berechnungsmethode wird der Zuwachs der Stromkreis-Kilometer von 2007 auf 2008 aus den Monitoringberichten der BNA als Ausgangslage abgeleitet. Hier besteht allerdings das Problem, dass die Zahl der teilnehmenden Unternehmen am Monitoring nicht in jedem Jahr identisch ist. Während die teilnehmenden VBN im Bericht für das Jahr 2007 (BNA 2008) 92,3 % des gesamten Netto-Elektrizitätsverbrauchs transportierten, entsprach die Teilnehmerzahl im Monitoringbericht 2008 97 % (BNA 2009). Die Zuwächse der Stromkreis-Kilometer werden mit den Daten der Bundesnetzagentur also tendenziell leicht überschätzt. Werden dagegen die durchschnittlichen Zuwächse der Stromkreis-Kilometer der Jahre 1998 – 2008 verwendet (BDEW 2009), sind die Zuwächse im Vergleich zu den Investitionszahlen der Jahre 2007 und 2008 eher zu gering geschätzt. Der Grund liegt in den niedrigeren Investitionszahlen der Jahre 2000 bis 2005, die sich auch in geringeren Zuwachsraten der Stromkreis-Kilometer in diesen Jahren niederschlagen müssten. Die tatsächlichen Zahlen sollten zwischen diesen beiden Rändern liegen.

Tab. 108: Jährlicher Neubau und Erneuerung des Stromnetzes in km

nach Daten der BNA	HS-Netz	MS-Netz	NS-Netz	nach Daten des BDEW	HS-Netz	MS-Netz	NS-Netz
Veränderung 2007 auf 2008 in km	746	7.078	34.874	jährl. Veränderung zw. 1998 und 2008 in km	1.416	2.588	18.194
Investitionen in Ausbau/Neubau/Erweiterung in Mio. Euro	637	378	840	Investitionen in Ausbau/Neubau/Erweiterung in Mio. Euro	637	378	840
Kosten pro km Ausbau/Neubau	853.620	53.400	24.094	Kosten pro km Ausbau/Neubau	449.718	146.044	46.182
Erhalt/ Erneuerung in km	215	6.365	31.359	Erhalt/ Erneuerung in km	408	2.327	16.360

Quelle: Eigene Berechnungen auf Grundlage der Zuwächse der Stromkreiskilometer in BNA (2009 und 2008) bzw. BDEW (2009) sowie Investitionszahlen entnommen dem Monitoringbericht der BNA (2009)

Aus der obigen Tabelle wird ersichtlich, dass sich mit den unterschiedlichen Zuwachsraten der Netzlängen sehr unterschiedliche Kosten für den Ausbau der verschiedenen Netzebenen ergeben. Diese wiederum beeinflussen nach unserer Methode die geschätzte Länge der erneuerten Netzlängen.

Die 850.000 Euro Investitionskosten für einen Kilometer Hochspannungs-Freileitungen (Tab. 108, 2. Spalte, 4. Zeile) entsprechen in etwa den angegebenen Kosten für den Bau einer 380 kV-Freileitung pro km in Paul (2007). Brakelmann (2004) kommt dagegen nur auf Kosten zwischen 300.000 (110 kV) und 450.000 Euro (380 kV) pro Kilometer Freileitung. Die grundsätzliche Übereinstimmung der hier geschätzten Kosten des Ausbaus des HS-Netzes mit den Kostenangaben bei Paul (2007) und Brakelmann (2004) lässt darauf schließen, dass

auch die geschätzten Kosten pro ausgebautem Kilometer MS- und NS-Netz realistische Werte darstellen. Für diese Studie werden die Kostendaten verwendet, die sich aus den durchschnittlichen Netzzuwächsen der Jahre 1998 bis 2008 ergeben (rechte Tabellenhälfte der Tab. 108).

Um die Materialflüsse für Aus- und Neubau und Erneuerung und Erhalt abschätzen zu können, müssen einige Annahmen getroffen werden. Diese orientieren sich an den Verhältnissen der Bestandsschätzung. So wird angenommen, dass die Investitionen im Hochspannungsnetz komplett für Freileitung erfolgten. Weiterhin wird unterstellt, dass der Aus- und Neubau im Mittelspannungsbereich zu 75 % in Kabelbauweise erfolgt. Dementsprechend sind 25 % der Ausbauinvestitionen im MS-Netz als Freileitungen abgeschätzt.

Weitere Annahmen lauten: Bei Erdkabeln sowie MS-Freileitungen bestehen die Leiter je zur Hälfte aus Kupfer und Aluminium. HS-Freileitungen bestehen aus Al/St-Seilen. Es werden typische Leiterquerschnitte je Netzebene verwendet. Die Freileitungsmasten im HS-Netz bestehen zu 100 % aus Stahlfachwerk und wiegen 15 t pro Mast, da unterstellt wird, dass überwiegend in 380 kV-Freileitungen investiert wird. Die Masten im MS-Netz bestehen je zur Hälfte aus Beton und Stahlfachwerk und wiegen 3 t (Beton) bzw. 4 t (Stahl). An HS-Masten werden immer zwei Stromkreissysteme geführt, die als 4er Bündel ausgeführt werden. MS-Freileitungen führen dagegen nur einen Stromkreis ohne Bündelung. MS-Kabel werden als Kabel mit einem Leiter verbaut, in NS-Kabel sind alle Leiter in einem Kabel integriert.

Aus dem jährlichen Ausbau des Stromnetzes um 22.200 km ergeben sich unter Beachtung der oben genannten Annahmen folgende Materialbedarfe für den Aus- und Neubau des Stromnetzes:

Tab. 109: Jährlicher Materialbedarfe für den Aus- und Neubau des Stromnetzes abgeleitet aus den Daten von 1998-2008

		NS in t	MS in t	HS in t	Insgesamt in t
Kabel	Kupfer	20.013	5.840		25.854
	Aluminium	15.465	1.267		16.731
	PE	16.375	3.578		19.953
	Sand	4.275.590	1.746.900		6.022.490
Freileitungen	Kupfer		2.912		2.912
	Aluminium		505	12.868	13.373
	Stahl		239	4.797	5.035
	PE		194		194
Freileitungsmasten	Stahl-		20.381	21.240	41.621
	Beton		27.174		27.174
Fundament	Beton			99.120	99.120

Quelle: Eigene Berechnungen

Die über die Kostenrelationen abgeleiteten Daten der Investitionen in Erneuerung ergeben nach unserer Hochrechnung eine jährliche Instandsetzung von 19.000 km Stromnetz mit Schwerpunkt im NS-Netz (siehe Tab. 110). Bei Investitionen in Erneuerung wird zusätzlich angenommen, dass im HS-Netz zu je 50 % ein Austausch von 220 kV-Freileitungen durch 380 kV sowie ein 1:1-Tausch von 110 kV erfolgt. Hinsichtlich der Erneuerung alter MS-Netze wird geschätzt, dass 50 % der Erneuerung als Austausch Freileitung vs. Kabelleitung erfolgt und 50 % alte Kabelleitungen gegen Neue ersetzt werden. Der Austausch von Freileitungen gegen Kabelleitungen wird vor allem bei regionalen Netzbetreibern vorgenommen, da Ka-

belnetze deutlich weniger wartungsintensiv sind als Freileitungen. Aufgrund der geringen Anteile an Freileitungen im Bestand der NS-Netze bestehen die Erneuerungsinvestitionen geschätzt zu 20 % aus einem Wechsel von Freileitungen zu Kabelleitungen (im ländlichen Raum) und zu 80 % aus der Erneuerung alter Kabelbereiche. In der Erneuerung der MS- und NS-Netze werden also keine neuen Freileitungen mehr erstellt.

Tab. 110: Jährlicher Materialbedarf für die Erneuerung des Stromnetzes, abgeleitet aus den Daten von 1998-2008

		NS in t	MS in t	HS in t	Insgesamt in t
Kabel	Kupfer	18.021	7.002		25.023
	Aluminium	13.906	1.518		15.425
	PE	0	4.290		4.290
	Sand	768.928	1.047.216		1.816.143
Freileitungen	Kupfer				
	Aluminium			2.819	2.819
	Stahl			1.051	1.051
	PE				
Freileitungsmasten	Stahl-			5.103	5.103
	Beton				
Fundament	Beton			14.288	14.288

Quelle: Eigene Berechnungen auf Grundlage der getroffenen Annahmen

Da ein Teil der Freileitungen im NS- und MS-Netz im Rahmen der Erneuerung gegen Kabelleitungen getauscht wird, fällt auch ein Materialbedarf für Sand an. Für Erneuerungen alter Kabelleitungen wird jedoch angenommen, dass die alte Sandbettung wiederverwendet wird.

Durch den Abbruch alter Kabel- und Freileitungen stehen größere Materialflüsse einer Wiederverwertung grundsätzlich zur Verfügung. Während Freileitungen zurückgebaut werden, ist es unklar ob alte Kabelleitungen bei Erneuerungen, die in optimierter Trassenführung erfolgen⁶¹, einfach nur abgeschaltet werden und im Erdreich verbleiben. Über den Umfang solcher abgeschalteten Erdkabel liegen jedoch keine Informationen vor. Würde von einem vollständigen Rückbau der Frei- und Kabelleitungen ausgegangen werden, beliefen sich die Abbruchmengen der Frei- und Kabelleitungen des deutschen Stromnetzes auf folgende Mengen:

⁶¹ Optimierte Trassenführung bedeutet, dass die neue Kabelleitung nicht ausschließlich entlang der vorhandenen Trassenführung erfolgt, sondern Teilbereiche komplett neu verlegt werden.

Tab. 111: Jährliche Menge an Abbruchmaterial aus Frei- und Kabelleitungen im Stromnetz, abgeleitet aus den Daten von 1998-2008

		NS in t	MS in t	HS in t	Insgesamt in t
Kabel	Kupfer	14.397	34.907		49.304
	Aluminium	11.125	698		11.823
	PE	1.309	2.094		3.403
	PVC	11.779	2.094		13.874
	Isolieröl/Haftmasse	1.309	524		
	Blei	3.926	2.793		
Freileitungen	Kupfer		5.236		5.236
	Aluminium		908	1.929	2.837
	Stahl		429	719	1.148
	PE		349		349
Freileitungs- Masten	Stahl-Fachwerk		36.653	3.062	39.714
	Beton		48.870		48.870
Fundament	Beton			115.120	115.120

Quelle: Eigene Berechnungen

5.1.2 Erdgasnetz

Nach Mineralöl ist Erdgas in Deutschland der wichtigste Energieträger. 2006 wurden rund 88,3 Mrd. m³ Erdgas verbraucht und damit fast 23 % des deutschen Primärenergieverbrauchs (E.ON Ruhrgas 2007) und deutlich mehr als Kernenergie (13 %) oder Steinkohle (13 %). Knapp die Hälfte des Wohnungsbestandes in Deutschland wird mit Erdgas beheizt und 11 % der erzeugten Nettostrommenge stammt aus erdgasbetriebenen Kraftwerken, häufig KWK-Anlagen (Kraft-Wärme-Kopplung).

Von den 88 Mrd. m³ Erdgas, die 2006 verbraucht wurden, stammten rund 15 % aus einheimischen Lagerstätten, der Rest wurde importiert. Die drei wichtigsten Importländer für Erdgas sind Russland (35 %), Norwegen (27 %) und die Niederlande (19 %). Weitere wichtige Importländer sind Dänemark und Großbritannien (zusammen 4 %). Das importierte Erdgas wird an 13 Übergabestationen in das deutsche Erdgasnetz eingespeist. Da die in Deutschland geförderten Mengen mit 15 % des Gesamtverbrauches eher gering sind und der Anteil zukünftig wohl noch sinken dürfte, wird in diesem Projekt die Infrastruktur der Erdgasförderung (Gaslagerstätte, Sondenplatz, Gasaufbereitungsanlage etc.) nicht mit erfasst.

5.1.2.1 Struktur des Erdgasnetzes in Deutschland

Innerhalb Deutschlands wird das Erdgas über überregionale Ferngasleitungen verteilt und in die nachgeordneten regionalen Netze, an lokale Versorger bzw. industrielle Großkunden weitergeleitet. Mit der Novellierung des Energiewirtschaftsgesetzes (EnWG) wurden 19 Marktgebiete geschaffen, in denen überregionale Netzbetreiber als Marktverantwortliche fungieren und denen die 768 Netzbetreiber mit ihren 1.007 Gasnetzen und Teilnetzen zugeordnet sind (Drenckhan et al. 2006). Die überregionalen Netzbetreiber sind zudem verpflichtet, wichtige Strukturdaten ihrer Netze zu veröffentlichen. Anhand dieser Daten kann das Netz an Hochdruckgasleitungen differenziert nach Durchmesser kategorien unterschieden werden.

Im Fernleitungsnetz wird Gas normalerweise mit einem (Hoch-)Druck⁶² von 60 bis 100 bar in Stahlrohren transportiert⁶³. Die Rohre haben einen Rohrdurchmesser zwischen 110 mm und 1.400 mm. Die Rohrwandstärke differenziert je nach Druck, Durchmesser und Stahlqualität zwischen 12 und 35 mm. Als äußerer Korrosionsschutz sind die Stahlrohre mit einer Kunststoffschicht (z.B. Polyethylen) umhüllt, sowie mit einem kathodischen Korrosionsschutz versehen. Häufig werden die Rohrrinnenwände zudem noch mit einer dünnen Schicht aus Epoxidharz beschichtet.⁶⁴

Durch Reibung der Gasmoleküle untereinander und entlang der Rohrwand sinkt mit jedem Transportkilometer der Rohrdruck um ungefähr 0,1 bar. Deshalb muss in regelmäßigen Abständen (ca. alle 150 km) der Gasdruck mittels einer Kompressorstation wieder auf das alte Niveau erhöht werden. In Kompressorstationen wird mit einer Gasturbine (manchmal auch Elektromotor) ein Verdichter betrieben, der das Erdgas wieder auf den alten Transportdruck konzentriert. Unterwegs gibt es zudem noch verschiedene Regelstationen, die einen gleichmäßigen Gasdruck im gesamten System gewährleisten sowie ungefähr alle 2 km Messeinrichtungen, um die Schutzstromstärke des kathodischen Korrosionsschutzes messen zu können.

Aus Sicherheitsgründen müssen in bestimmten Abständen (alle 20 km) Absperrarmaturen (Kugelhahn oder Schieberanlagen) installiert werden, die es ermöglichen, dass bei Havarien oder für Reparaturmaßnahmen bestimmte Abschnitte der Erdgasleitung vom System abgetrennt werden können. Zudem ist am Anfang und Ende jeder Pipeline eine so genannte Molchschleuse einzubauen, über die Molche⁶⁵ in die Erdgasleitung eingesetzt werden können.

Zum Ausgleich saisonaler Schwankungen werden in Deutschland 44 Untergrundgasspeicher mit einem Speichervolumen von 19,3 Mrd. m³ betrieben. Untergrundgasspeicher sind entweder Kavernenspeicher (35 % der deutschen Speicherkapazitäten) oder Porenspeicher (65 % der deutschen Speicherkapazitäten). Als Kavernenspeicher werden Speicheranlagen bezeichnet, die künstliche Hohlräume in ehemaligen Salzstöcken nutzen, während Porenspeicher geologisch zweckmäßige Gesteinsformationen nutzen, die sich durch eine poröse Form auszeichnen. Häufig werden dafür alte Erdgaslagerstätten verwendet. Um das Gas in den Speicher zu pressen, sind auch hier Kompressorstationen notwendig. Gleichzeitig muss es vor einer erneuten Einspeisung in das Fernleitungssystem in Aufbereitungsanlagen getrocknet und mit Hilfe von Druckreduktionsanlagen auf den entsprechenden Leitungsdruck reduziert werden. Dabei muss das Gas vorgewärmt werden, da sich Erdgas bei Reduzierung des Drucks abkühlt und die Gefahr der Vereisung von Ventilen und Reglern besteht.

An etlichen Ausgabepunkten der überregionalen Fernleitungsnetze wird das Erdgas an Großkunden übergeben oder in die regionalen Netze der lokalen Gasversorger eingespeist.

⁶² Als Hochdruck gilt jeder Druck über 1 bar, als Mitteldruck wird ein Druck zwischen 100 mbar und 1 bar bezeichnet. Alle Drücke unter 100 mbar sind Niederdruck.

⁶³ Die Nordstream-Pipeline, die quer durch die Ostsee Erdgas aus Russland nach Deutschland liefern soll, wird später sogar mit einem Druck von 220 bar betrieben werden. Die Gasrohre haben einen Durchmesser von 1,2 m und eine Wandstärke von 27 bis 41 mm. Zusätzlich werden diese Rohre mit einer 60 bis 110 mm starken Betonschicht ummantelt (<http://www.nord-stream.com/de/project/technical-concept.html>).

⁶⁴ Viele der hier genannten Informationen und Zahlen sind u.a. zu finden auf der Internetseite http://www.erdgaszuerich.ch/fileadmin/media/erdgas/basis-informationen/erdgas_transport.pdf.

⁶⁵ Molche sind Reinigungs- bzw. Prüfgeräte, die durch die Erdgasleitung mittels Druckluft transportiert werden und entweder Verunreinigungen in den Rohren beseitigen oder mit magnetfeldsensiblen Sensoren den Rohrwandzustand untersuchen.

Die lokalen Verteilernetze werden im Normalfall mit einem Druck von 6 bis 9 bar betrieben. Daher sind an allen Übergabestationen auch Druckreduziereinrichtungen mit einer Gasvorwärmung notwendig.

Um ausströmendes Gas rechtzeitig zu bemerken, wird das nahezu geruchslose Erdgas im lokalen Erdgasnetz (oder auch zentral im Hochdrucknetz) mit schwefelhaltigen Verbindungen (meist Tetra-Hydro-Thiophen, THT, bzw. Mercaptanmischungen) odorisiert.

Um Tagesschwankungen im Gasverbrauch ausgleichen zu können, verfügen einige lokale Erdgasversorger⁶⁶ über Speichermöglichkeiten in Form von oberirdischen Kugelspeichern oder unterirdisch verlegten Röhrenspeichern, in denen Gas mit hohem Druck eingepresst werden kann (bis 20 bar bei Kugelgasbehälter und bis zu 70 bar bei Röhrenspeicher). Die früher eingesetzten Niederdruckgasbehälter (häufig umgangssprachlich Gasometer genannt) spielen heute in der Gasversorgung keine Rolle mehr. Der größte Kugelspeicher Deutschlands wird von den Wuppertaler Stadtwerken betrieben und hat einen Durchmesser von 47 m und ein Speichervolumen von 272.000 m³. Die Kugel ist aus 30 mm dickem Stahlblech gefertigt. Die Möglichkeit, mit höherem Druck größere Mengen an Erdgas zwischen zu speichern und ihre „Unsichtbarkeit“ führt mittlerweile zu einer vermehrten Errichtung von Röhrenspeichern. Röhrenspeicher sind bis zu 2,5 m Durchmesser starke, 200 m lange und 23 mm dicke Stahlrohre, die unterirdisch verlegt sind.

Bevor das Erdgas schließlich zum Verbraucher kommt und damit in die Hausanschlussleitungen eingespeist werden kann, muss das Erdgas häufig noch weiter im Druck entspannt werden. Ortsnetze werden im Normalfall mit einem Druck von ca. 20 mbar betrieben. Zum Teil sind auch höhere Drücke bis 500 mbar möglich. Zur Druckreduzierung sind weitere Druckregelungsanlagen notwendig.

Das gesamte Netzsystem ist mit umfangreicher Regelungstechnik ausgestattet, so dass eine genaue Überwachung der Gasmenge, eine Überprüfung der Gasqualität, sowie die Bedienung der Schieber, Druckregelungsanlagen, Übergabestationen aus zentralen Leitstationen erfolgen kann.

Hochdruckleitungen bis 16 bar sind ausschließlich aus Stahl gefertigt. Die früheren örtlichen Gasnetze bestanden überwiegend aus Grauguss mit Stemmuffen aus Hanf. Das feuchte Stadtgas hat die Hanfdichtungen angefeuchtet und so abgedichtet. Das heute verwendete Erdgas ist trockener und ließ die Hanfdichtungen austrocknen und dadurch undicht werden. Später wurden Stahlrohre und ab den 1960er Jahren duktile Gussrohre mit Schraubmuffen als Gasleitungen bis 16 bar eingesetzt, meist in einem Durchmesser von 80 mm bis 600 mm. Im Niederdruckbereich sowie im Druckbereich bis 5 bar werden in den letzten Jahren allerdings fast vollständig PE-Rohre (häufig High Density Polyethylen - HDPE) verwendet. Die Durchmesser variieren zwischen 50 und 200 mm.

Im Bereich Erdgasnetz wird mit konkreten Netzdaten verschiedener Regional- und Ortsnetzbetreiber über den Anteil der verbauten Materialien und der verlegten Nenndurchmessern der Rohre gearbeitet. Diese Angaben werden dann hochgerechnet auf das Gesamtnetz der regionalen und örtlichen Erdgasverteilung. Damit sind wir in der Lage, die Abschätzung des Materialverbrauches deutlich konkreter durchführen zu können als dies Faist-Emmenegger

⁶⁶ Laut <http://www.gaswerk-augsburg.de/deutschland.htm> sind in Deutschland noch acht Kugelspeicher in Betrieb, sowie 36 Teleskop-, Scheiben- oder Schraubengasbehälter, die jedoch nahezu ausschließlich in Großbetrieben wie der BASF für den Schwankungsausgleich zum Einsatz kommen.

et al. (2007) möglich war, die in ihrer Abschätzung nur mit einem Nenndurchmesser pro Gasdruckebenen gerechnet haben.

5.1.2.2 Materialbestand des deutschen Erdgasnetzes

Das Erdgasnetz lässt sich grundsätzlich in drei Druckbereiche (Niederdruck (ND), Mittel- druck (MD), Hochdruck (HD)) unterteilen und ebenso auf drei Verteilnetzebenen (Fernlei- tungsnetz, Regionalversorgungsnetz und Ortsnetz). Erdgasunternehmen sind häufig sowohl als Regional- als auch als Ortsnetzbetreiber aktiv, zudem gibt es in ihrem Netzbereich so- wohl HD-, MD- und ND-Netzbereiche. Es wird daher für diese Studie nur der Fernleitungsbe- reich getrennt abgeschätzt, während das Regional- und Ortsnetz als Einheit behandelt wird.

Fernleitungsnetz

Das Fernleitungsnetz ist laut Bundesnetzagentur (2008) 56.476 km lang. Auf Grundlage der von den Gasunternehmen veröffentlichten Netzdaten ist es möglich, das Fernleitungsnetz konkret nach Nenndurchmessern zu erfassen. Die Ecolnvent-Daten (Faist-Emmenegger et al. 2007) beziehen sich dagegen im Fernleitungsbereich nur auf einen Nenndurchmesser, der nach unseren Daten den Materialbedarf überschätzt. Andere spezifische Materialdaten werden von Faist-Emmenegger et al. (2007) übernommen und an geringere Nenndurch- messer angepasst.

Tab. 112: Spezifischer Materialbedarf des Gasfernleitungsnetzes

Leitungsdurchmesser	Anteil in %*	Anteil in km	durch. Nenn- durchmesser in mm	durch. Wand- dicke in mm	Spezifischer Stahlbedarf in kg/m	PE(LD) für Rohrumhül- lung in kg/m	Bitumen für Rohrumhül- lung in kg/m
Klasse A: $x > 1000$ mm	13,89	7.846	1200	18	525	6,2	9,3
Klasse B: $700 < x < 1000$ mm	18,55	10.478	900	16	349	6,2	9,3
Klasse C: $500 < x < 700$ mm	21,83	12.327	600	16	230	5,2	8
Klasse D: $350 < x < 500$ mm	12,87	7.270	400	12	115	4,5	7,2
Klasse E: $225 < x < 350$ mm	16,27	9.190	300	10	71,5	4	6,5
Klasse F: $110 < x < 225$ mm	14,31	8.079	200	10	47	4	5,5
Klasse G: $x < 110$ mm	2,28	1.285	100	10	22,2	3	5
Gesamtleitungslänge	100,00	56.476					

Quelle: Eigene Berechnung, zum Teil auf Grundlage von Faist-Emmenegger et al. (2007), * Die Anteil der Nenn- durchmesser ergeben sich aus dem Zusammentragen von Leitungsdaten, die 70 % des Gesamt- Fernleitungsnetzes abbildeten.

Für jede Leitungsklasse (A-G) wird ein typischer Nenndurchmesser mit den entsprechenden Wanddicken verwendet und über Herstellerangaben von Druck-Stahlrohren das konkrete Gewicht pro Meter ermittelt. Das Gewicht der PE- bzw. Bitumenhülle wird anhand der Daten in Faist-Emmenegger et al. (2007) an die unterschiedlichen Nenndurchmesser angepasst.

Aus Tab. 113 geht hervor, welche Materialien in welchen Mengen im Gas-Fernleitungsnetz gebunden sind. Es wird dabei die Annahme getroffen, dass 100 % des Fernleitungsnetzes aus Stahlrohren besteht und der Korrosionsschutz bei 75 % der Rohre aus PE-Folie und bei 25 % aus einer Bitumenabdichtung besteht. Weiterhin wird der spezifische Sandbedarf aus Faist-Emmenegger et al. (2007) übernommen und es wird davon ausgegangen, dass 100 % des Fernleitungsnetzes in einem Sandbett verlegt sind.

Tab. 113: Materialbestand des Fernleitungsgasnetzes

in 1.000 t	Anteil in km	Stahl	PE(LD)	Bitumen	Sand
Klasse A: $x > 1000$ mm	7.846	4.119	36	18	17.890
Klasse B: $700 < x < 1000$ mm	10.478	3.657	49	24	23.891
Klasse C: $500 < x < 700$ mm	12.327	2.835	48	25	28.106
Klasse D: $350 < x < 500$ mm	7.270	836	25	13	14.176
Klasse E: $225 < x < 350$ mm	9.190	657	28	15	17.921
Klasse F: $110 < x < 225$ mm	8.079	380	24	11	15.754
Klasse G: $x < 110$ mm	1.285	29	3	2	2.506
Gesamt	56.476	12.513	213	108	120.243

Quelle: Eigene Berechnung, zum Teil auf Grundlage von Faist-Emmenegger et al. (2007)

Regional- und Ortsnetz

Die Gesamtlänge des deutschen Gasnetzes betrug im Jahr 2007 rund 420.000 km, abzüglich der 56.476 km Fernleitungsnetz bleibt ein Netz von 363.524 km. Davon sind 133.000 km ND-Leitungen, 180.000 km MD-Leitungen und 50.524 km HD-Leitungen. Über die Verteilung nach Materialien liegen beim BDEW nur Daten bis 1998 vor. Wir nehmen an, dass der Zuwachs seit 1998 im ND-Netz vollständig mit PE-Rohren erfolgt ist. Im MD-Netz-Bereich wird geschätzt, dass 75 % der Erweiterung in PE-Rohren und 25 % in Stahlrohren erfolgte. Für den Hochdruckbereich wird unterstellt, dass der Neubau seit 1998 zu 75 % in Form von Stahlrohren und zu 25 % mittels PE-Rohren erfolgte. Guss- und PVC-Rohre werden entweder kaum oder überhaupt nicht mehr im Neubau verwendet und sind nur noch im Bestand zu finden.

Über die Daten verschiedener Netzbetreiber kann eine Abschätzung über die verwendeten Nenndurchmesser vorgenommen werden und zudem die Abschätzung der Verteilung nach Rohrmaterialien anhand der BDEW-Daten von 1998 überprüft werden. Aus den Daten wird deutlich, dass in den verschiedenen Netzebenen häufig mit Standard-Nenndurchmessern gearbeitet wird. Firmen wie E.ON, die mehrere Gasnetze betreiben, dürften zudem ihren Materialeinkauf über gleiche Nenndurchmesser in allen Netzen optimieren. Aus Tab. 114 geht der Materialaufwand sowie die geschätzte Verteilung der Nenndurchmesser und Materialarten hervor.

Tab. 114: Materialbestand des regionalen und örtlichen Erdgasnetzes

	Material	Nenndurchmesser in mm	Rohrlänge in km	Wanddicke in mm	Spezi. Materialbedarf (t/km) ^a	Gesamtbestand in 1.000 t
Hochdruck	Stahl (90 %)	400 (25 %)	11.368	12	126,28	1.436
		200 (25 %)	11.368	10	51,59	586
		150 (25 %)	11.368	10	37,95	431
		100 (25 %)	11.368	10	24,42	278
	PE (10 %)	200 (100 %)	5.052	18	11,33	57
	PE-Folie		45.472		1,6	73
Mitteldruck	Stahl (10 %)	150 (50 %)	9.000	6	23,43	211
		100 (50 %)	9.000	6	15,29	138
	PE (80 %)	150 (25 %)	36.000	15	7,337	264
		100 (50 %)	72.000	10	3,454	249
		80 (25 %)	36.000	7	1,617	58
	Grauguss (5 %)	150 (50 %)	4.500	10	29,04	131
		100 (50 %)	4.500	10	19,91	90
	Duktiler Guss (5 %)	150 (50 %)	4.500	10	29,04	131
		100 (50 %)	4.500	10	19,91	90
	PE-Folie		36.000		1,6	58
Niederdruck	Stahl (50 %)	150 (25 %)	16.625	6	23,43	390
		100 (50 %)	33.250	6	15,29	508
		80 (25 %)	16.625	5	10,23	170
	PE (40 %)	150 (25 %)	13.300	15	7,337	98
		100 (50 %)	26.600	10	3,454	92
		80 (25 %)	13.300	7	1,617	22
	Duktiler Guss (10 %)	150 (50 %)	6.650	10	29,04	193
		100 (50 %)	6.650	10	19,91	132
	PE-Folie		79.800		1	80
Graben- und Rohrbettung	Sandverbrauch	85 %	308.995		600-1000	202.575
	Zementverbrauch	15 %	54.529		26	1.418
Straßen- und Flussquerungen	Füll-Beton		363.524		1	364
	Betonmantelrohre		363.524		3	1.091
	Armierte Beton-Strukturen		363.524		2	727

Quelle: Eigene Berechnung, auf Grundlage von Angaben von Netzbetreibern, Herstellerangaben und Annahmen aus Faist-Emmenegger et al. (2007); ^a Es werden für Armaturen pauschal 10 % des spez. Materialbedarfs für Rohre eingerechnet. Die ausgewiesenen Zahlen sind inkl. des Materialbedarfs für Armaturen.

Die Angaben zu PE-Folie als Korrosionsschutz aus Faist-Emmenegger et al. (2007) wurden den entsprechend niedrigeren Rohrdurchmessern angepasst. Zudem wird davon ausgegangen, dass alle Guss- und Stahlrohre mit einer PE-Folie gegen Korrosion geschützt werden. Aus Faist-Emmenegger et al. (2007) werden weiterhin die Annahmen für Grabenprofile und Rohrbettungsmaterialien übernommen. Demnach sind 85 % des Leitungsnetzes in Sand eingebettet und 15 % mit Faserzementmörtel ummantelt. Zusätzlich wird aus Faist-Emmenegger et al. (2007) der Materialverbrauch für die Querung spezieller Hindernisse wie Straßenquerungen und Flussquerungen für das Gesamtnetz übernommen. Schließlich wird analog zur Vorgehensweise bei Faist-Emmenegger et al. (2007) 10 % des spezifischen Rohrgewichtes für Armaturen, Molchschleusen, Absperrhähne etc. angesetzt und hinzuaddiert.

5.1.2.3 Jährliche Materialbedarfe für Ausbau und Instandhaltung des Erdgasnetzes

Die Abschätzung des Materialbedarfs für den Ausbau und die Erneuerung der Gasnetze folgt der gleichen Systematik wie die der Stromnetze. Aus Daten des BDEW (2009) ist der jährliche Anstieg des Erdgasnetzes gegliedert nach Druckstufen ermittelbar. Zusätzlich sind Investitionszahlen der Gasnetzbetreiber in der Unterscheidung nach Aus- und Neubau sowie Erneuerung und Erhalt aus den Monitoringberichten der BNA verfügbar. Allerdings schätzt die BNA die Qualität der Investitionszahlen selbst als schlecht ein, da nur ein Teil der Netzbetreiber umfassende Angaben getätigt habe.

Obwohl die Hälfte des Hochdruck-Netzes (HD-Netzes) im Besitz der Betreiber der Verteilnetze (VNB) ist, wird in dieser Studie der Ausbau des HD-Netzes komplett den Fernleitungsnetzbetreibern (FNB) zugerechnet. Die Investitionen der VNB werden anteilig den Zuwächsen der Netzlängen (82 % Mitteldruck (MD) und 18 % Niederdruck (ND)) zugerechnet. Dadurch ergeben sich rein rechnerisch gleiche Kostenrelationen des Neubaus von MD- und ND-Rohren. Diese Annahme ist zulässig, da in beiden Druckebenen die Verwendung von PE-Rohren mit identischen Nenndurchmessern unterstellt wird.

Aus den Daten des BDEW und der BNA ergeben sich unter Anwendung dieser Annahmen folgende Längen des Ausbaus und der Erneuerung des Gasnetzes:

Tab. 115: Ausbau und Erneuerung des Gasnetzes

nach Daten BDEW und BNA	HD-Netz	MD-Netz	ND-Netz
durchschnittlicher jährlicher Zuwachs 1998 - 2008 in km	1.490	6.152	1.390
Investitionen in Ausbau/Neubau/ Erweiterung in Mio. Euro	430	407	89
Kosten pro km Ausbau/Neubau	288.591	66.112	64.230
Erhalt/ Erneuerung in km	128	3.721	841

Quelle: Eigene Berechnungen auf Grundlage von Daten der BNA (2008, 2009) sowie des BDEW (2009)

Für die Abschätzung des Materialbedarfs für Neubau und Erneuerung werden folgende Annahmen getroffen: HD-Leitungen wurden als Fernleitungen als Stahlrohr erbaut. Erneuerungsinvestitionen im HD-Netz waren mit 128 km Streckenlängen eher marginal. Die Erweiterung und der Austausch der MD- und ND-Leitungen erfolgten komplett durch PE-Rohre. Der Zuwachs und Austausch an Gasleitungen wurde entsprechend den Nenndurchmessern des Bestands aufgeteilt. Da PE-Rohre erst seit einigen Jahren im Bereich der MD- und ND-Netze verwendet werden, wird angenommen, dass die ausgetauschten Gasrohre entweder aus Grauguss, duktilem Guss oder Stahl bestanden und gegen PE-Rohre getauscht wurden. Aus den Zuwachsdaten und den benannten Annahmen ergeben sich folgende Materialbedarfe für Neu- und Ausbau im Fernleitungsnetz (Tab. 116) und Verteilnetz (Tab. 117):

Tab. 116: Jährlicher Materialbedarf für Neu- und Ausbau im Ferngasnetz abgeleitet aus den Daten von 1998-2008

in Tonnen	Anteil in km	Stahl	PE(LD)	Bitumen	Sand
Klasse A: $x > 1000$ mm	207	108.680	1.283	1.925	471.980
Klasse B: $700 < x < 1000$ mm	276	96.481	1.714	2.571	630.305
Klasse C: $500 < x < 700$ mm	325	74.802	1.691	2.602	741.519
Klasse D: $350 < x < 500$ mm	192	22.056	863	1.381	373.995
Klasse E: $225 < x < 350$ mm	242	17.336	970	1.576	472.803
Klasse F: $110 < x < 225$ mm	213	10.018	853	1.172	415.642
Klasse G: $x < 110$ mm	34	753	102	170	66.123
Gesamtleitungslänge	1.490	330.126	7.476	11.397	3.172.366

Quelle: Eigene Berechnungen

Tab. 117: Jährlicher Materialbedarf für Neu- und Ausbau im Verteilungsnetz abgeleitet aus den Daten von 1998-2008

	Material	Nenndurchmesser in mm	Rohrlänge in km	Wanddicke in mm	Spezi. Materialbedarf in t/km	Gesamt in Tonnen
Mitteldruck	PE (100 %)	150 (25 %)	1538	15	7,337	11.284
		100 (50 %)	3076	10	3,454	10.625
		80 (25 %)	1538	7	1,617	2.487
Niederdruck	PE (100 %)	150 (25 %)	347,5	15	7,337	2.550
		100 (50 %)	695	10	3,454	2.401
		80 (25 %)	347,5	7	1,617	562
Grabenbettung	Sandverbrauch	100 %	7.542		850	6.410.700
Strassen- und Flussquerrungen	Füll-Beton		7.542		1	7.542
	Betonmantelrohre		7.542		3	22.626
	Armierte Beton-Strukturen		7.542		2	15.084

Quelle: Eigene Berechnungen

Der starke Anstieg des Erdgasnetzes spiegelt sich in den hohen jährlichen Materialströmen wider. Bis auf den Bereich der MD-Netze sind die Materialbedarfe für Erneuerung und Erhaltung deutlich niedriger als für den Neu- und Ausbau.

Tab. 118: Materialverbrauch für die jährliche Erneuerung des Ferngasnetz in t abgeleitet aus den Daten von 1998-2008

in Tonnen	Anteil in km	Stahl	PE(LD)	Bitumen	Sand
Klasse A: $x > 1000$ mm	18	9.352	110	166	
Klasse B: $700 < x < 1000$ mm	24	8.302	147	221	
Klasse C: $500 < x < 700$ mm	28	6.436	146	224	
Klasse D: $350 < x < 500$ mm	17	1.898	74	119	
Klasse E: $225 < x < 350$ mm	21	1.492	83	136	
Klasse F: $110 < x < 225$ mm	18	862	73	101	
Klasse G: $x < 110$ mm	3	65	9	15	
Gesamt	128	28.406	643	981	0

Quelle: Eigene Berechnungen

Tab. 119: Materialverbrauch für die jährliche Erneuerung des VNB abgeleitet aus den Daten von 1998-2008

	Material	Nenndurchmesser in mm	Erneuerung an Rohrlänge in km	Wanddicke in mm	Spezi. Materialbedarf in t/km	Gesamt in t
Mitteldruck	PE (100 %)	150 (25 %)	930	15	7,337	6.825
		100 (50 %)	1.860	10	3,454	6.426
		80 (25 %)	930	7	1,617	1.504
Niederdruck	PE (100 %)	150 (25 %)	210	15	7,337	1.542
		100 (50 %)	420	10	3,454	1.452
		80 (25 %)	210	7	1,617	340
Grabenbettung	Sandverbrauch	100 %			600	0
Straßen- und Flussquerrungen	Füll-Beton		4.562		1	4.562
	Betonmantelrohre		4.562		3	13.685
	Armierter Beton-Strukturen		4.562		2	9.123

Quelle: Eigene Berechnungen

Es wird davon ausgegangen, dass alle Bestandteile der Systeme bei Erneuerungsinvestitionen komplett ausgetauscht werden. Lediglich für die Sandbettung wird eine Weiternutzung nach Auswechslung der Rohre, Armaturen und weiterer Komponenten angenommen.

Neben dem oben genannten Austausch von alten Guss- und Stahlrohren im Bereich der MD- und ND-Netze durch PE-Rohre wird weiter angenommen, dass die Stahlrohre im HD-Netz 1:1 ausgetauscht werden. In der Realität wird im Rahmen der Erneuerung von Fernleitungsrohren auch die Leistungsfähigkeit des Netzes durch Erhöhung der Nenn Durchmesser der verbauten Leitungen erhöht. Darüber liegen jedoch keine detaillierten Informationen vor. Deshalb wird sich an der bestehenden Verteilung der Nenn Durchmesser orientiert. Aus dem Austausch der Stahlrohre im HD-Netz ergibt sich, dass die Materialmengen, die für Erneuerung und Erhalt in dieser Netzebene aufgebracht werden müssen gleichzeitig als Abfallmengen anfallen und für eine Verwertung zur Verfügung stehen. Die Höhe der tatsächlichen Verwertungsquote der einzelnen Stoffkategorien ist jedoch nicht bekannt. Die Netzbetreiber vergeben diese Arbeiten zumeist an Bau- und Abbruchunternehmen und haben selbst nur sehr eingeschränkte Kenntnisse über die Art der Verwertung. Netzbetreiber unterliegen zudem Rückbauverpflichtungen, so dass es sehr unwahrscheinlich ist, dass alte Rohrsysteme einfach abgeschaltet werden und im Erdreich liegen bleiben. Wenn, dann kommt dies vermutlich nur in städtischen ND-Netzen vor.

Allerdings gibt es vor allem im ND- und MD-Bereich die technische Entwicklung, dass alte Rohre, die früher ausgewechselt wurden, nun mit Hilfe von so genannten Kunststofflinern erneuert werden. Dabei wird im Zugverfahren ein Kunststoffschlauch in die alten sanierungsbedürftigen Erdgasrohre gezogen. Welche Anteile der reparaturbedürftigen Rohre inzwischen mit Liner saniert werden ist nicht bekannt. Diese Verfahren bieten aber enorme Materialeinsparungspotentiale.

5.1.3 Das Fernwärmenetz in Deutschland

Das Fernwärmenetz ist im Gegensatz zum Erdgas- und Stromnetz sehr klein. Es konzentriert sich vor allem auf die städtischen Ballungszentren und da wiederum auf die ostdeut-

schen Ballungsgebiete. Die Wärmeversorgung des Wohnungsbestandes ist – wie schon erwähnt – vor allem durch Erdgasheizungen geprägt. Aktuell werden ca. 10 % der erzeugten Strommenge in KWK-Anlagen produziert (Ernst 2008). Gleichzeitig wird 80 % der Fernwärme mit Kraft-Wärme-Kopplung erzeugt. Es besteht also ein enger Zusammenhang zwischen Stromerzeugung in KWK-Anlagen und Fernwärmeversorgung. Die Bedeutung des Fernwärmenetzes könnte in Zukunft noch deutlich zunehmen, wenn das Ziel der Bundesregierung, den KWK-Stromanteil von heute ca. 10 % bis zum Jahr 2020 auf 25 % zu erhöhen, tatsächlich umgesetzt werden wird. Ernst (2008) kommt vor diesem Hintergrund zu der Einschätzung, dass der Ausbau der Kraft-Wärme-Kopplung nur durch Verdichtung und Ausbau der Nah- und Fernwärmeversorgung⁶⁷ erreicht werden kann. Voß/Blesl (2005) schlussfolgern dagegen, dass zwar langfristig die KWK-Stromerzeugung zunehmen wird, dass dies jedoch ohne nennenswerten Ausbau der Fernwärmeversorgung gelingen kann. Nur wenn einerseits die Preise für Erdöl und Erdgas dauerhaft hoch sind und weiter steigen und gleichzeitig die Verlegungskosten neuer Wärmeinfrastruktur deutlich gesenkt werden können, ist bis zum Jahr 2020 ein Ausbau der Fernwärmeversorgung um 50 % im Vergleich zum Jahr 2005 zu erwarten.

5.1.3.1 Die Struktur des deutschen Wärmenetzes

Die Datensituation im Fernwärmebereich ist sehr unzureichend. Eine der wenigen Datenquellen ist der jährliche Hauptbericht der Fernwärmeversorgung der Arbeitsgemeinschaft für Wärme und Heizkraftwirtschaft e.V. (AGFW) vor. Dieser Hauptbericht wird auf Grundlage einer freiwilligen Befragung der Unternehmen der Fernwärmeversorgung erhoben. Die Freiwilligkeit der Teilnahme an der Befragung hat aber zur Folge, dass in jedem Jahr unterschiedliche Unternehmen an der Befragung teilnehmen und die Daten daher im Zeitverlauf nicht vergleichbar sind. Der Hauptbericht der Fernwärmeversorgung 2006 erfasst eine Trassenlänge von 19.148 km. Der Großteil (18.268 km) sind Heizwassernetze, der Rest (880 km) Dampfnetze (Schmitz 2008). Die AGFW schätzt, dass das gesamte Fernwärmenetz in Deutschland eine Länge von rund 25.000 km umfasst (Besier 2006). Eine aktuelle Abschätzung, die auch die Verkaufszahlen der Hersteller von Fernwärme-Rohrsystemen sowie geschätzte Zahlen zu Nahwärmenetzen berücksichtigt, kommt zu einer Gesamtlänge des deutschen Heizwassernetzes zwischen 90.000 und 100.000 km (Besier 2007).

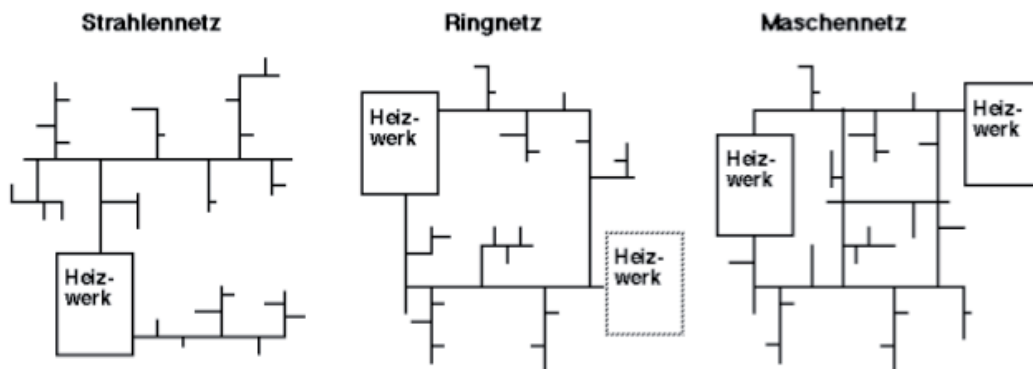
Fernwärme beliefert zu 50 % private Haushalte, zu 44 % öffentliche Einrichtungen und andere Nichtwohngebäude und zu 6 % Industriekunden. Rund 14 % der deutschen Wohngebäude werden mit Nah- oder Fernwärme beheizt. In Großstädten mit mehr als 100.000 Einwohnern liegt der Anteil der Nah- und Fernwärme am Wärmemarkt bei rund 30 % (AGFW 2007). Die im Hauptbericht 2006 erfassten 234 Fernwärmeversorgungsunternehmen (91 % des Wärmemarktes) betreiben dabei 1.523 verschiedene Netze (1.446 Wasser- und 77 Dampfnetze). Die Wärme für diese Netze wird in 3.130 Anlagen erzeugt. Der Großteil der Wärmeerzeugungsanlagen sind keine KWK-Anlagen (2.305), allerdings stammen 80 % der Wärmenetzeinspeisung aus KWK-Anlagen (Schmitz 2008). Neben Fernwärmenetzen gibt es noch einige wenige Kältenetze, die öffentliche Einrichtungen und Kaufhäu-

⁶⁷ Es gibt keine eindeutige Unterscheidung zwischen Nah- und Fernwärme. Als Nahwärme wird überwiegend Wärme aus dezentralen Quellen, wie BHKW, bezeichnet, die mit geringeren Temperaturen übertragen werden und nur wenige Gebäude beheizen. Typische Leistungen von Nahwärmequellen liegen zwischen 50 kW und 1 MW.

ser mit Kälteleistungen versorgen. Aufgrund ihrer geringen Bedeutung wurden Dampfnetze und Kältenetze in diesem Projekt nicht weiter untersucht.

Fernwärmenetze können grundsätzlich als Ein- bis Vierrohrsystem betrieben werden. Üblich ist jedoch ein 2 Rohrsystem, in dem ein Rohr (Vorlaufrohr) die Wärme zum Verbraucher führt und das zweite Rohr (Rücklaufrohr) vom Verbraucher zum Heizwerk wieder zurückgeführt wird. Die Temperatur im Rücklaufrohr (bis 70°C) ist dementsprechend niedriger als im Vorlaufrohr (bis 130°C). Als Netzformen kommen Strahlennetze, Ringnetze und Maschenetze zum Einsatz (Abb. 10).

Abb. 9: Übersicht über Netzformen der Fernwärmeversorgung



Quelle: Fraunhofer Institut UMSICHT / bremer energie institut. 2004

In 2006 wurde das Fernwärmenetz laut der AGFW (AGFW 2007) um rund 2.000 km Trassenlänge ausgebaut. Diese hohe Zahl ergibt sich vermutlich aus der Hochrechnung der Angaben der Hersteller über verkaufte Rohrleitungssysteme. Demnach wurden im Jahr 2006 in Deutschland Mantelrohre in der Länge von 2.500 km verkauft (Besier 2007). Gut die Hälfte (55 %) der verkauften Rohre waren Kunststoffmantelrohre (KMR), die andere Hälfte (45 %) entfiel auf flexible Rohrsysteme. Da ein Großteil der flexiblen Rohrsysteme Kombirohre sind (Vor- und Rückleitung verlaufen in einem Rohr), erhöht sich rein rechnerisch die über die Verkäufe abgeschätzte Erweiterung des Fernwärmesystems auf 3.500 km Rohrlänge.

Es wird geschätzt, dass mittlerweile 80 % des Fernwärmenetzes aus Kunststoffmantelrohren (KMR) bestehen. Stahlmantelrohre und andere Verlegungssysteme sind demnach eher unbedeutend (Besier 2007). Um Wärmeverluste während des Transportes zu minimieren, sind erdverlegte Wärmerohre immer in drei Schichten aufgebaut. In der Mitte befindet sich das so genannte Mediumrohr, das meist aus Stahl, aber zum Teil auch aus Kupfer oder Kunststoff besteht. Um das Mediumrohr liegt eine Schicht aus PUR-Hartschaum und um diese Schicht wiederum ein Polyethylen-Mantelrohr. Teilweise werden auch Mantelrohre verwendet, die sowohl innen wie außen ein Mantelrohr verwenden und dadurch den nachträglichen Einzug des Rohres in das Mantelrohr erlauben. KMR werden bis zu einer Nennweite von 1.200 mm verlegt und können für eine maximale Verlauftemperatur bis 140°C verwendet werden.

Früher wurden Fernwärmenetze auch als Freileitungen oder in Kanalbauweise verlegt. Die äußere Ummantelung mit einem festen Material konnte dabei weggelassen werden, da die

Rohre sowohl in Freileitungen als auch im Kanal auf Sockeln angebracht waren und die Wärmeisolation der Rohre somit von Luft umgeben war.

Stahlmantelrohre werden heute vor allem noch als Dükerleitungen bei Querungen von Gewässern und Querungen von stark befahrenen Straßen mit hoher Belastung verwendet. Flexible Stahlmantelrohre werden in der Regel für Verbindungen zwischen verschiedenen Gebäuden und/oder langen Anschlussleitungen vor allem in geringeren Nenndurchmessern verwendet (Winkens 1994).

Je nach Nenngröße der Rohre kommen noch unterschiedliche Armaturen zum Einsatz, die bestimmte Streckenabspernungen bei Havarie oder Reparaturarbeiten ermöglichen. Im Bereich 40 bis 65 mm werden als Absperrung Ventile oder Kugelhähne eingesetzt. Bei Nennweiten von 80 bis 150 mm zusätzlich auch Schieber, im Bereich 200 bis 350 mm hauptsächlich Schieber und ab Durchmesser > 400 mm werden überwiegend Klappen verwendet. Es liegen aber keine Angaben über die Gesamtzahl der Absperrarmaturen vor oder eine „Damenregel“, in welchen Abständen eine solche Armatur angebracht werden sollte (Winkens 1994).

In fest verschweißten und erdverlegten Mantelrohren verläuft im Isoliermaterial in der Regel ein Messdraht mit, der eine Netzüberwachung mit hoher Genauigkeit (± 2 m) ermöglichen soll. Bei Freileitungen und Kanalverlegung wurde die Überwachung über regelmäßige Kontrollgänge durchgeführt.

Einige Fernwärmeversorgungsunternehmen unterhalten Wärmespeicher, um saisonale und tageszeitbedingte Schwankungen auszugleichen. Die Mehrzahl der Unternehmen regelt Schwankungen im Wärmebedarf jedoch über eine Kombination aus Temperatur- und Mengenregelung. Bei längerfristig höherem Bedarf (saisonal) kann die Temperatur des Heizwassers erhöht werden. Bei tageszeitlichen Spitzen haben die Fernwärmeversorgungsunternehmen die Möglichkeit, mit einem höheren Pumpaufwand und dadurch höherem Leitungsdruck verstärkte Nachfrage zu befriedigen (Fraunhofer Institut UMSICHT/bremer energie institut. 2004).

Neben den eigentlichen Rohrleitungen und ihren Armaturen sind für einen einwandfreien Betrieb des Netzes weitere zentrale Einrichtungen notwendig. Zunächst ist sicherzustellen, dass der Netzdruck nicht unter bestimmte Höchst- und Untergrenzen fällt, oder es durch Lecks oder Ausfall der Umwälzpumpe zu Druckstößen kommt und im Fall von Lecks ein Leerlaufen des Systems verhindert wird. Durch die unterschiedliche Temperatur des Fernheizwassers dehnt sich und schrumpft das Volumen des Wassers. Es muss daher je nach Temperatur Wasser zu oder ab geführt werden. Dazu dienen Ausgleichsspeicher und Zu- und Abflusseinrichtungen. Um Korrosion im Fernwärmenetz zu verhindern muss das Heizwasser salzfrei und sauerstoffarm sein. In den Heizkraftwerken ist in der Regel eine Vollentsalzungsanlage vorhanden. Anlagen zur Entsalzung und Sauerstoffbindung sind aber vermutlich auch für Nahwärmesysteme notwendig oder zumindest sinnvoll.

In Heizstationen sind in der Regel Pumpeinrichtungen (Umwälzpumpen) vorhanden. Bei großen Fernwärmenetzen sind jedoch auch Zwischenpumpstationen notwendig. Darüber hinaus sind zur zentralen Steuerung und Überwachung des Gesamtsystems noch Fernleittechnik und eine Leitzentrale mit entsprechender Ausstattung an Technik notwendig.

Wenig bis keine Daten liegen bis jetzt für verwendete Materialien und Nenngrößen für die Rohre der Nahwärmenetze vor, die ihre Wärme durch dezentrale BHKW oder ähnliches bekommen.

Als Problem des Abschneidekriteriums bleibt die Frage zu beantworten, ob Wärmeübergabestationen und Hauszentralen noch im Fokus dieser Studie liegen, oder ob diese nicht schon jenseits der Grundstücksgrenze liegen. Einerseits liegt die Wärmeübergabestation noch in der Verantwortung des Fernwärmeverstärkers. Andererseits bildet sie zusammen mit der Hauszentrale die so genannte Hausstation. In dieser Studie werden beide Einrichtungen als Einheit begriffen, die im Verantwortungsbereich der Hausverwaltung und damit außerhalb des Fokus dieser Studie liegt.

5.1.3.2 Der Materialbestand des deutschen Wärmenetzes

Die Datensituation im Fernwärmenetz ist nur unzureichend. Der Materialbestand des Fernwärmenetzes wird anhand der aktuellen Schätzung der Arbeitsgemeinschaft Fernwärme (AGFW) mit 25.000 km veranschlagt.⁶⁸ Allerdings liegen für den Anteil der verschiedenen Rohrmaterialien und Verlegungsarten, sowie der verwendeten Rohrdurchmesser nur Daten aus dem Jahr 1988 vor (Winkens 1994). Diese Daten sind nicht konsistent. So wird einmal der Anteil der Freileitungen mit 11 % und an einer anderen Stelle mit 18 % angegeben. Zusätzlich liegen für 10 bis 15 % des Fernwärmenetzes in Winkens (1994) keine Angaben zur Bauweise oder den Nenndurchmessern vor. Die Daten von Winkens werden in dieser Studie entsprechend den dort angegebenen prozentualen Anteilen auf die vollständige Netzlänge von 9.263 km angepasst.

Tab. 120: Struktur des Fernwärmenetzes 1988

Netzstruktur 1988 (9263 km)	
	in %
Kanalverlegt	40,4
Kunststoffmantelrohr (KMR)	24,3
Stahlmantelrohr (SMR)	8,8
Faserzementmantelrohr	6,6
Freileitung/Hausleitungen	19,9

Quelle: Eigene Abschätzung basierend auf Winkens (1994)

⁶⁸ Die offizielle Länge des Fernwärmenetzes wird mit 19.147 km angegeben (AGFW 2007). Diese Zahlen beruhen aber auf unvollständigen Befragungen der Netzbetreiber. Die AGFW schätzt die tatsächliche Länge des Fernwärmenetzes auf 25.000 km (AGFW 2007). Wir haben diese Schätzung übernommen.

Tab. 121: Verwendete Nenndurchmesser im Fernwärmenetz 1988

Nenndurchmesser	Kanalverlegt	KMR	Faserzement-	SMR	Freileitung
0-65	674	990	280	381	1004
80-125	748	540	255	117	422
150-200	861	405	204	54	160
250-300	599	180	51	20	85
350-500	636	90	25	39	120
600-700	187	23	0	0	30
800 und mehr	37	23	0	0	23
Summe	3742	2251	815	611	1844

Quelle: Eigene Abschätzung basierend auf Winkens (1994), Angaben in km

Es wird davon ausgegangen, dass die Erweiterung von 9.263 km (1988) auf jetzt 25.000 km überwiegend mit Kunststoffmantelrohren (KMR) erfolgte. Mittlerweile werden Fernwärmeleitungen fast ausschließlich als KMR-Rohre verlegt. Kanalverlegung wird aus Kostengründen nur noch in Ausnahmefällen durchgeführt. Freileitungen werden – wenn überhaupt – nur noch in Industriegebieten verlegt. Der Anstieg der Länge des Fernleitungsnetzes seit 1988 um 15.737 km wird anteilig über die Verteilung der durchschnittlichen Netzerweiterung der Jahre 2001 bis 2006 zugeschätzt (Besier 2007). Daher wird in dieser Studie die Annahme getroffen, dass 80 % des Zuwachses seit 1988 als KMR⁶⁹ erfolgte, die restlichen Verlegungsarten mit Ausnahme von Faserzementrohren wuchsen jeweils zwischen 2 - 10 % seit 1988. Daraus ergibt sich für die geschätzten 25.000 km Fernwärmenetz eine Verteilung nach Bauweise nach Tabelle Tab. 122.

Tab. 122: Struktur des Fernwärmenetzes in 2006

	in %	in km
Kanalverlegt	18,1	4.529
Kunststoffmantelrohr (KMR)	59,4	14.841
Stahlmantelrohr (SMR)	4,5	1.130
Faserzementmantelrohr	2,4	611
Freileitung/Hausleitungen	15,6	3.889
Gesamt	100,0	25.000

Quelle: Eigene Abschätzung basierend auf der Verteilung in 1988

Die prozentuale Verteilung nach Nenndurchmessern in 1988 wird auf die Struktur der heutigen Länge des Fernwärmenetzes von 25.000 km angewendet. Die Verteilung in 1988 führt jedoch dazu, dass gerade für die großen Nenndurchmesser, die als Hauptleitungen den Fernwärmehtransport vom HKW in die feingliedrigen Netzebenen in Wohngebieten übernehmen, keine Stahlmantelrohre (SMR) Verwendung finden sollen, obwohl sie genau für diesen Zweck prädestiniert sind.

Für den spezifischen Materialbedarf der verschiedenen Verlegungsarten liegen zum Teil gut abgesicherte Daten vor. Für KMR gibt es detaillierte Herstellerangaben, die eine Aufteilung

⁶⁹ Bei geringen Nenndurchmessern werden in den letzten Jahren auch verstärkt sogenannte metallische Mediumrohr-Systemen (MMR) verwendet. Der genaue Marktanteil ist nicht bekannt, weshalb in dieser Studie der Netzzuwachs als herkömmliche KMR-Systeme unterstellt wird.

des Gesamtgewichtes in die Anteile des Mediumrohres aus Stahl⁷⁰, des PE-Mantelrohres und des PUR-Hartschaums ermöglichen. Auch für SMR kann über die Rohr-Durchmesser des Medium- und Mantelrohres, die jeweilige Wanddicke und die Dicke der Isolierschicht sehr genau der jeweilige Gewichtsanteil abgeschätzt werden. Kanalverlegte Wärmeleitungen und Freileitungen werden als SMR minus des Stahlmantels, mit zusätzlicher PE- oder Bitumenabdichtung abgeschätzt. Als Annahme dient – analog zum Erdgasnetz –, dass 85 % der SMR, Freileitungen und kanalverlegten Fernwärmeleitungen mit PE-Ummantelung und 15 % mit einer Bitumenabdichtung gegen Korrosion geschützt sind. Für den Materialverbrauch der Zementmantelrohre wurden die Daten aus dem Erdgasbereich (Betonmantelrohre) übernommen. Für Kanalverlegung liegen keinerlei Daten vor, aus denen hervorginge, welche Materialien verbaut wurden und in welcher Bauweise die Kanäle errichtet sind. Über Herstellerangaben liegen lediglich Daten für einen vollständig begehbaren Betonkanal vor, der verschiedene Rohrsysteme gleichzeitig aufnehmen kann. Diese Daten würden den Bestand mit ihren Altkanälen vermutlich deutlich überschätzen. Aus diesem Grund werden nur 50 % des Gewichtes pro Meter zur Abschätzung des Materialverbrauchs für Kanalbauten herangezogen. Für KMR und SMR wird der Bedarf an Sand aus den Abschätzungen der Gasnetze übernommen. Gleichzeitig wird analog zum Gasnetz mit 10 % zusätzlichem Gewicht für Armaturen wie Absperrhähne, Schieber u.ä. kalkuliert. Das Gewicht für Armaturen wird zu 50 % als Stahl und zu 50 % als Guss geschätzt. Aus diesen Annahmen ergibt sich folgender Materialbedarf für das Fernwärmenetz in Deutschland von 25.000 km Länge:

⁷⁰ Es gibt mittlerweile aus KMR mit einem Kunststoff-Mediumrohr. Wir gehen in diesem Bericht jedoch davon aus, dass für alle KMR ein Stahlmediumrohr verwendet wurde.

Tab. 123: Materialbestand Fernwärmenetz in t

in t	ND	Beton	Zement	Sand	Stahl	Guss- eisen	Mineral- wolle	PUR- Hart- schaum	PE	Bitumen
Kanal- verlegt	0-65	1.805.753			21.586	1.152	1.383		306	204
	80-125	2.006.392			37.093	1.975	2.390		476	340
	150-200	2.307.351			60.583	3.228	4.909		547	391
	250-300	1.605.114			95.769	5.092	8.844		543	399
	350-500	1.705.433			141.277	7.508	13.933		577	423
	600-700	501.598			85.962	4.460	6.659		272	170
	>800	100.320			22.484	1.152	1.503		54	34
Kunststoff- mantelrohr	0-65			3.917.894	24.056	2.057		10.650	8.489	
	80-125			2.137.033	32.860	2.376		8.837	8.192	
	150-200			1.602.775	41.290	2.818		10.680	7.212	
	250-300			949.793	51.767	3.496		14.297	7.361	
	350-500			474.896	38.841	2.530		7.588	6.708	
	600-700			148.405	20.419	1.411		5.894	3.309	
	>800			148.405	27.782	1.727		3.790	4.704	
Stahl- mantelrohr	0-65			423.029	25.408	1.317	1.196		264	176
	80-125			130.163	9.883	521	572		114	81
	150-200			59.658	5.996	318	469		52	37
	250-300			28.925	5.520	289	441		27	20
	350-500			57.850	14.061	743	1.309		54	40
	600-700			0	0	0	0		0	0
	>800			0	0	0	0		0	0
Freileitung/ Gebäude verlegt	0-65				7.828	695	3.592		794	529
	80-125				8.219	597	2.350		468	334
	150-200				5.234	361	1.594		178	127
	250-300				7.758	500	2.179		134	98
	350-500				16.564	1.046	4.591		190	140
	600-700				8.533	508	1.842		75	47
	>800				8.981	514	1.600		58	36
Faser- zement- mörtel	0-65		2.522		708					
	80-125		2.866		1.635					
	150-200		2.293		2.201					
	250-300		764		1.554					
	350-500		382		1.169					
	600-700		0		0					
	>800		0		0					
Gesamt		10.031.96	8.826	10.078.826	833.021	48.392	61.356	61.734	51.159	3.626

Quelle: Eigene Berechnungen auf Grundlage von Herstellerangaben und Annahmen aus Faist-Emmenegger et al. (2007)

Für das Nahwärmenetz stehen noch weniger Informationen zur Verfügung als für das Fernwärmenetz. Die AGFW schätzt das Nahwärmenetz auf rund 75.000 km Länge. Da Großteile dieses Netzes erst in den letzten Jahren aufgebaut wurden, wird in dieser Abschätzung von einem Nahwärmenetz ausgegangen, das zu 100 % aus KMR besteht. Weiterhin wird angenommen, dass nur die drei niedrigsten Nenndurchmesser in Nahwärmenetzen zum Einsatz kommen und die 75.000 km zu je einem Drittel den unteren drei Nenndurchmesserkategorien zugeschlagen werden. Über die Verlegungsart von Nahwärmenetzen liegen keine Informationen vor. Sie werden zum Teil erdverlegt und können dann mit einem entsprechenden Sandbedarf verbunden sein. Gleichzeitig werden sicherlich auch Teile des Nahwärmenetzes in Kellern von Gebäuden verlegt sein. Zudem werden Nahwärmenetze eventuell dann erstellt, wenn durch geplante Tiefbauarbeiten an Wasser-, Strom- oder Telekommunikationsleitungen eine gleichzeitige Verlegung mit anderen Netzinfrastrukturen erfolgen kann. Der Bedarf an Sand würde nach unserem Ermessen deutlich überschätzt, würde man jedem

Infrastruktursystem eine eigene Sandbettung zurechnen. Wir haben deshalb dem Nahwärmenetz keine eigene Bettung zugerechnet. Weiterhin werden keine Materialbedarfe für Armaturen geschätzt, da keine Informationen vorliegen inwieweit diese in dezentralen kleinen Nahwärmenetzen von Bedeutung sind. Aus Tab. 124 kann der spezifische Materialbedarf pro km Nahwärmeleitung und die Summe der gespeicherten Materialien, die sich aus dieser Abschätzung ergibt, entnommen werden.

Tab. 124: Spezifischer Materialbedarf und Materialbestand von Nahwärmenetzen

in t/km		ND	Stahl (Mediumrohr)	PE (Mantelrohr)	PUR-Hartschaum
Kunststoffmantelrohr	0-65	50	3	1	2
	80-125	100	9	2	2
	150-200	150	14	3	4

in t	ND	Netzlänge in km	Stahl (Mediumrohr)	PE (Mantelrohr)	PUR-Hartschaum
Kunststoffmantelrohr	0-65	25.000	84.225	32.500	40.775
	80-125	25.000	213.975	57.500	62.025
	150-200	25.000	360.050	67.500	99.950
Summe		75.000	658.250	157.500	202.750

Quelle: Eigene Abschätzung

Auf eine Abschätzung der jährlichen Flüsse der Fern- und Nahwärmenetze wird verzichtet, obwohl sie zukünftig an Bedeutung gewinnen. Die aktuellen jährlichen Zuwachsraten des Fernwärmenetzes liegen im Bereich weniger Kilometer bundesweit (46 km pro Jahr, BDEW 2009). Zu Nahwärmenetzen wiederum liegen keinerlei Daten vor, an Hand derer der jährliche Zuwachs oder der jährliche Materialbedarf der Erneuerung abgeschätzt werden könnte. Da beim Bau von Wärmenetzen heutzutage fast vollständig Kunststoffmantelrohre (KMR) bzw. flexible KMR verwendet werden, ließe sich aus den Bestandsschätzungen ableiten, welche Materialflüsse sich aus einem möglicherweise angestrebten oder erwarteten Ausbau des Fernwärme- bzw. Nahwärmenetzes um 10 % oder 20 % ergeben würden.

5.2 Infrastruktureinrichtungen zur Energieerzeugung

Im Bereich der Energieerzeugung kann auf umfangreiche Literatur und Sachbilanzen für verschiedene Energieerzeugungstechnologien zurückgegriffen werden (verschiedene EcolInvent-Berichte, Bauer 2008, Edelmann et al. 2001, Hirschberger 2005, FfE 1996, Ramesohl et al. 2005, Briem et al. 2004, Hennings et al. 2006, Mayer-Spohn et al. 2007, Marheinecke 2001, Manstein 1995, Salzer 2008, Nitsch et al. 2004). Da in der Literatur häufig der Materialbedarf für konventionelle Kraftwerke für typische Kraftwerksgrößen ausgewiesen ist, wird der Materialbestand der deutschen Stromerzeugungsinfrastruktur über den Materialverbrauch in Tonnen/MW anlagengenau hochgerechnet.

Zur Abschätzung des Bestandes an konventionellen Stein- und Braunkohlekraftwerke, Kernenergie, Erdgaskraftwerke und Heizkraftwerke konnte auf die UBA-Kraftwerksdatenbank (UBA 2006) zurückgegriffen werden. Allerdings sind in dieser Datenbank nur Kraftwerke mit einer Leistung >100 MW gelistet. In Gesprächen mit Vertretern des BDEW wurde deutlich, dass es im Moment keine vollständige anlagengenaue Auflistung deutscher Kraftwerke nach Energieträgern gibt. Der BDEW stellte dem Wuppertal Institut eine Auflistung zur Verfügung, die zum einen eine Bestandsaufnahme des BMWi mit Stichtag 31.12.2000 enthält, sowie darauf aufbauend die vom BDEW erfassten Zu- und Abgänge des Kraftwerkbestandes seit 2001.⁷¹ Aus diesen Daten ergibt sich für konventionelle Kraftwerke plus Wasserkraftwerke ein Bestand zum Jahre 2009 von:

Tab. 125: Bestand an Kraftwerken in Deutschland

	Bestand Ende 2000	Stilllegung seit 2001- 2005	Inbetriebnahme/ Modernisierung/ Erweiterung seit 2001	Bestand Ende 2009
Braunkohlekraftwerke	81	4	1	78
Steinkohlekraftwerke	51	11	5	45
Mischfeuerung	135			135
Heizöl	69	2		67
Erdgas	408	10	31	429
Kernkraftwerke	21	2		19
Müll	62	1	19	80
Laufwasserkraftwerke	316		4	320
Pumpspeicherwerke	60		2	62
Übrige	33			33

Quelle: BMWi / BDEW unveröffentlicht

Allerdings sind die Kraftwerksanlagen in der Auflistung des BMWi lediglich in sieben Leistungskategorien sortiert, die keine Rückschlüsse auf die genaue Leistung der einzelnen Kraftwerke zulassen.

Die in der UBA-Datenbank aufgelisteten Kraftwerke >100 MW repräsentieren jeweils mind. 85 % der installierten Bruttoleistung der einzelnen Kraftwerkskategorie.⁷² Für Erdgas-,

⁷¹ Wobei Zugänge in den Unterlagen des BDEW auch Modernisierung und Erweiterung sein können, die zu einer Leistungserhöhung geführt haben.

⁷² Der Vergleichswert für die Bruttoleistung der deutschen Strom- und Wärmeerzeugung stammt aus Nitsch (2008).

Mischfeuerung-⁷³ und Wasserkraftanlagen ist die Anzahl der in der UBA-Datenbank gelisteten Kraftwerke deutlich zu gering, da diese Kraftwerkskategorien häufig kleinere Anlagen mit Leistungen von unter <100 MW umfassen. In dieser Studie werden für Kraftwerke mit fossilen Brennstoffen die Angaben der UBA-Datenbank verwendet und anschließend um die fehlenden Kraftwerke (aus den BDEW-Unterlagen) unter <100 MW ergänzt. Die Bestandszahl der Wasserkraftanlagen wird vom BMU (ohne Jahr) mit einer Gesamtzahl von 7.654 Anlagen angegeben. Davon sind 7.300 Anlagen weder in der UBA noch in der BDEW-Datenbank enthalten, da ihre Leistung unter 1 MW liegt. Für Windenergieanlagen können Daten des Instituts für Solare Energieversorgungstechnik (ISET) der Universität Kassel (jetzt Fraunhofer Institut für Windenergie und Energiesystemtechnologie (IWES)) verwendet werden, die alle Windenergieanlagen sortiert nach Leistungsklassen enthalten. Diese werden durch DEWI-Statistiken ergänzt (DEWI 2009). Bei BHKW sind der Bestand und die Leistungsklasse der Anlagen unklar. Laut AGFW (2005) gab es 1998 rund 5.500 BHKW mit einer Leistung von 2,1 GW_{el.}. Neuere Angaben (Gores 2010) zeigen, dass der Bestand an BHKW in Deutschland eher im Bereich von 33.000 liegt, mit einer durchschnittlichen Leistung von 100 kW_{el.} pro Anlage. Für den Bestand an Biogasanlagen liegen aktuelle Daten aus den Veröffentlichungen der Fachagentur für Nachwachsende Rohstoffe (FNR) und des Deutschen Biomasse-Forschungszentrums (DBFZ) vor. Da aber keine Informationen über die Verteilung nach Leistungsklassen vorhanden sind, werden die Materialbedarfe der BHKW und Biogasanlagen über durchschnittliche Leistungsgrößen hochgerechnet.

5.2.1 Materialbestand und Materialflüsse der Braunkohle- und Steinkohlekraftwerke

Die UBA-Datenbank listet konventionelle Kraftwerke nach Anlagentyp und Primärenergieeinsatz (Tabelle 26). Für die Abschätzung des Materialbestandes wird als Unterscheidungskriterium die Art des Primärenergieeinsatzes gewählt.

Tab. 126: Kraftwerkstypen

Anlagentyp	Primärenergien
Dampfkraftwerk (DKW)	Steinkohle, Braunkohle, Erdgas und HS
Druckwasserreaktor (DWR)	Uran
Gasturbine mit Abhitzekessel (G/AK)	Erdgas
Gasturbine (GT)	Erdgas, HEL, Gichtgas und HS
Gas- und Dampfkraftwerk (GuD)	Steinkohle, Erdgas, Raffineriegas und HS
Heizkraftwerk (HKW)	Steinkohle, Braunkohle, Erdgas, Gichtgas und HEL
Siedewasserreaktor (SWR)	Uran
Sammelschienenanlage (SSA)	Steinkohle

Quelle: Umweltbundesamt (2006)

Für die Abschätzung des Materialbestands der Braunkohle- und Steinkohlekraftwerke werden zunächst die Daten der UBA-Datenbank verwendet, ergänzt um die BDEW-Informationen (für meist kleinere Kraftwerke bis 100 MW). Es gibt jedoch eine Überschnei-

⁷³ Mischfeuerungskraftwerke sind Kraftwerke, die neben Steinkohle auch noch mit Gas oder Heizöl betrieben werden (können). In dieser Studie werden Mischfeuerungskraftwerke komplett als Steinkohlekraftwerke gewertet.

dung der UBA-Datenbank mit der Abgrenzung der einzelnen Leistungsklassen in der BMWi-Datenbank, deren dritte Leistungskategorie Kraftwerke mit einer Leistung von 50 - 150 MW enthält. Die in dieser Kategorie enthaltene Anzahl an Kraftwerken wurde um die Kraftwerke bis einschließlich 150 MW aus der UBA-Datenbank bereinigt.

Aus den kombinierten Daten des UBA, BMWi und BDEW ergibt sich ein Bestand an 53 Braunkohlekraftwerken mit einer Leistung von 100 MW und mehr, für die eine individuelle Anlagenleistung bekannt ist, sowie 25 Braunkohlekraftwerken mit einer Leistung von 150 MW und weniger, denen über den Mittelwert ihrer Leistungskategorie eine Anlagenleistung zugewiesen wird.⁷⁴ Weiterhin sind in der UBA-Datenbank 50 Steinkohlekraftwerke mit einer Leistung von >100 MW verzeichnet, vier mehr als in der aktualisierten Auflistung des BMWi für alle Steinkohlekraftwerke. Allerdings sind in der BMWi-Liste zusätzlich noch insgesamt 135 Mischfeuerungskraftwerke gelistet, die neben Steinkohle auch Gas oder Öl als Primärenergiequelle verwenden und in unserer Abschätzung komplett als Steinkohlekraftwerke verbucht werden. Der Großteil dieser Kraftwerke hat eine Leistung von <150 MW (115 Kraftwerke). Für unsere Abschätzung verwenden wir somit die Angaben der 50 Steinkohlekraftwerke aus der UBA-Datenbank sowie 130 Kraftwerke der BMWi-Datenbank mit einer Leistung von kleiner 100 MW.

Aus verschiedenen Literaturquellen sind detaillierte Informationen über die verbauten Materialmengen pro MW vorhanden. Bei Dones et al. (2007) wird der Materialbedarf für zwei verschiedene Kraftwerksgrößen (100 und 500 MW) angegeben. Weiterhin stehen Daten von Manstein (1995) für ein 750 MW-Steinkohlekraftwerk zur Verfügung, die aber auf Grund der geringen Detailtiefe in dieser Studie nicht verwendet werden. Salzer (2008) schätzt den Materialbedarf für ein 600 MW-Braunkohle- bzw. ein 750 MW-Steinkohlekraftwerk ab. Ebenfalls sehr detaillierte Daten liegen aus der FfE-Studie (1996) für ein 550 MW-Steinkohle- und ein 978 MW-Braunkohlekraftwerk vor. Bauer (2008) schätzt in seiner Studie den Materialbedarf für zwei Steinkohlekraftwerke (400 MW und 800 MW) sowie ein Braunkohlekraftwerk (950 MW). Diese Angaben werden für diese Studie in Tonnen pro MW umgerechnet und diese Werte dann anschließend mit der Anlagenleistung der einzelnen Kraftwerke multipliziert.⁷⁵

Wir haben in dieser Studie den Bestand an Braun- und Steinkohlekraftwerken mit den Angaben in verschiedenen Literaturangaben hochgerechnet, um die mögliche Spannweite zu illustrieren (Tab. 127). Werden die Daten aus Dones et al. (2007) verwendet, ergibt sich der

⁷⁴ Die Kraftwerke in der BMWi/BDEW-Datenbank sind sortiert nach sieben Leistungsklassen (1-10 MW, >10-50 MW, >50-150 MW, >150-300 MW, >300-500 MW, >500-1000 MW, >1000 MW). Die Anzahl der höheren Leistungsklassen stimmt weitestgehend mit den Daten der UBA-Datenbank überein. Für diese Studie interessant sind die drei niedrigsten Leistungsklassen, die nur zum Teil durch die UBA-Datenbank abgedeckt sind. Zur Abschätzung des Materialbedarfs der Kraftwerksanlagen wird jeweils der Mittelwert der Leistungsklassen (5, 30, 100 MW) als Leistung der jeweiligen Anlagen verwendet.

⁷⁵ Aus Gründen der Vereinfachung unterstellt diese Methode einen linearen Zusammenhang des Materialverbrauchs pro MW. Vermutlich ist der Materialverbrauch pro MW bei größeren Anlagen geringer als bei kleineren Anlagen. Der Unterschied in den Daten von Bauer (2008) und Dones et al. (2007) ist allerdings nicht so groß, dass diese Vereinfachung nicht zulässig wäre. Bei der Berechnung des Materialbestandes von Kohlekraftwerken mit den Daten von Dones et al. (2007) und Bauer (2008) werden zudem die kleineren Anlagen mit den spezifischen Materialkoeffizienten der kleineren Anlage kombiniert. Konkret werden alle Anlagen bis 400 MW bei der Nutzung der Zahlen aus Dones et al. (2007) mit den Materialkoeffizienten der 100 MW Kraftwerke berechnet, die größeren Anlagen mit den Koeffizienten der 500 MW-Kraftwerke. Zur Berechnung des Materialbestandes der Steinkohlekraftwerke mit den Koeffizienten aus Bauer et al. (2008) werden alle Steinkohlekraftwerke bis 600 MW mit den Koeffizienten des 400 MW-Kraftwerks berechnet, Größere Anlagen werden mit den Koeffizienten des 800 MW-Kraftwerks berechnet.

niedrigste Materialbestand für den bestehenden Kraftwerkspark. Allerdings werden in Dones et al. (2007) deutlich weniger Materialkategorien abgeschätzt als in den restlichen drei Studien. Zudem ermitteln Dones et al. (2007) einen geringeren Betonbedarf pro MW als die restlichen Studien. Die gespeicherte Menge an metallischen Rohstoffen im Bestand der Kohlekraftwerke wird mit den unterschiedlichen Koeffizienten ebenfalls unterschiedlich hoch geschätzt, auch wenn die Differenzen zwischen den einzelnen Studien geringer sind (sowohl absolut als auch prozentual). Die Koeffizienten für Braunkohlekraftwerke unterscheiden sich zudem deutlicher als die der Steinkohlekraftwerke.

Für die weiteren Analysen der jährlichen Materialflüsse werden die Bestandsdaten, die sich aus der Verwendung der Materialkoeffizienten aus Bauer (2008) ergeben verwendet. Die Werte von Bauer sind zum einen am detailliertesten und zum anderen zusammen mit den Daten von Salzer (2008) die aktuellsten Daten.

Tab. 127: Materialbestand der Steinkohlekraftwerke

in Tonnen		nach Dones et al. (2007)	nach Salzer (2008)	nach FfE (1996)	nach Bauer (2008)
Mineralische Rohstoffe	Beton	9.182.905	9.713.988	13.297.419	14.525.013
	Ziegelsteine/Mauerwerk		373.089	508.562	
	Asphalt/Bitumen		6.476	8.684	9.610
	Keramik/Fliesen			10.205	11.340
Metallische Rohstoffe	Stahl unlegiert	2.235.247	1.195.180	1.738.699	1.062.625
	Stahl legiert/rostfrei	248.361	226.660	304.911	1.071.118
	Gusseisen		34.683	25.561	28.379
	Aluminium	22.689	17.989	37.777	68.325
	Kupfer	38.328	35.978	52.249	20.096
	Messing			687	7.036
	Zink			245	3.013
	Blei			147	2.010
	sonstige NE Metalle		5.936		
Kunststoffe und sonstige Rohstoffe	Mineralwolle	24.299	75.553	101.850	112.956
	Glas		504	687	763
	Holz		72	98	90
	PVC			50.238	52.623
	PE			3.336	4.520
	PP			2.600	2.264
	Schmieröl			8.046	25.064
	Gummi			3.091	3.418
	Epoxidharz				5.988
	GFK			11.775	15.803
	SAN			540	756
	Sonstige	35.107	61.162	5.397	
Summe Mineralische Rohstoffe		9.182.905	10.093.553	13.824.869	14.545.963
Summe Metallische Rohstoffe		2.544.625	1.516.425	2.160.276	2.262.602
Summe Kunststoffe und sonstige Rohstoffe		59.406	137.291	187.657	224.245
Summe Insgesamt		11.786.936	11.747.270	16.172.802	17.032.810

Quelle: Eigene Berechnung auf Grundlage der spezifischen Materialkoeffizienten aus Dones et al. (2007), Salzer (2008), FfE (1996) und Bauer (2008)

Tab. 128: Materialbestand der Braunkohlekraftwerke

in Tonnen		nach Dones et al. (2007)	nach Salzer (2008)	nach FfE (1996)	nach Bauer (2008)
Mineralische Rohstoffe	Beton	8.117.275	15.614.688	9.578.713	12.017.473
	Ziegelsteine/Mauerwerk		583.727	360.800	440.531
	Sand/Kies/Schotter			4.059.676	4.952.556
	Asphalt/Bitumen		23.714	73.839	18.032
	Keramik/Fliesen			739	821
Metallische Rohstoffe	Stahl unlegiert	2.179.375	2.297.147	2.928.056	3.532.458
	Stahl legiert/rostfrei	242.153	490.695	327.160	212.878
	Gusseisen		46.333	28.582	36.665
	Aluminium	16.235	7.297	59.514	91.390
	Kupfer	30.007	32.835	45.122	26.842
	Messing			1.701	9.385
	Zink			3.201	3.256
	Blei			425	2.684
	sonstige NE Metalle		132.251		
Kunststoffe und sonstige Rohstoffe	Mineralwolle	18.355	207.953	125.586	46.516
	Glas		839	515	629
	Holz		109	67	125.866
	PVC			37.356	
	PE			2.082	60.197
	PP			1.544	
	Schmieröl			8.796	24.517
	Gummi			783	
	Epoxidharz				
	GFK			7.274	
	SAN			336	
	Sonstige	25.766	76.249		
Summe Mineralische Rohstoffe		8.117.275	16.222.129	14.073.766	17.429.412
Summe Metallische Rohstoffe		2.467.769	3.006.557	3.393.762	3.915.559
Summe Kunststoffe und sonstige Rohstoffe		44.121	285.150	184.339	257.724
Summe Insgesamt		10.629.165	19.513.837	17.651.868	21.602.696

Quelle: Eigene Berechnungen auf Grundlage der spezifischen Materialkoeffizienten aus Dones et al. (2007), Salzer (2008), FfE (1996) und Bauer (2008)

Jährlicher Materialbedarf für Ausbau, Erneuerung und Instandhaltung

Konventionelle Kohlekraftwerke sind gekennzeichnet durch eine lange Nutzungsdauer. Den deutschen Kraftwerkspark zeichnet zudem aus, dass mehrere Kraftwerke in einer engen zeitlichen Phase von 10 - 20 Jahren errichtet wurden, so dass es zu typischen Investitionszyklen kommt, innerhalb derer sich große Teile des Kraftwerkspark erneuern und technische Pfadabhängigkeiten festgelegt werden. Nachdem viele westdeutsche Kraftwerke Mitte der 70er bzw. 80er Jahre errichtet wurden und Anfang der 90er Jahre der ostdeutsche Kraftwerksbestand ersetzt wurde, steht Deutschland aktuell am Beginn einer neuen Investitionsphase im Bereich der Energieerzeugung. Entsprechend oszillierend sind die Investitionsausgaben der Energiewirtschaft in den letzten 20 Jahren. Der BDEW (2008a) listet aktuell durchgeführte bzw. geplante Kraftwerksneubauten mit einer Gesamtleistung von 14,5 GW bzw. 24,3 GW auf. Die UBA-Kraftwerksdatenbank führt geplante oder schon begonnene Kraftwerksneubauten in einem Umfang von 28,2 GW elektrischer Bruttoleistung auf. Da in der UBA-Datenbank nur Kraftwerke mit einer Leistung von >100 MW gelistet sind, fehlen allerdings Neubauprojekte von kleineren Kraftwerken. Allerdings betrifft dies nach Daten des

BDEW (2008) lediglich 5 Müllverbrennungsanlagen, 2 Laufwasserkraftwerke und ein Pumpspeicherwerk, die aktuell errichtet werden.

Die von der BDEW zur Verfügung gestellten Informationen über Inbetriebnahme, Modernisierung bzw. Erweiterung führen für den Zeitraum 2001 bis 2009 nur ein einziges Braunkohlekraftwerk und fünf Steinkohlekraftwerke. Von den fünf gelisteten Steinkohlekraftwerken ist jedoch nur ein einziges ein Neubau. Bei drei Steinkohlekraftwerken finden Modernisierungen statt und bei einem erfolgte eine Umstellung des Primärenergieeinsatzes von Erdgas/Öl auf Steinkohle. Nimmt man diese Zahlen zum Maßstab, sind Neubauten von Kohlekraftwerke in den letzten Jahren kein bedeutender Faktor für jährliche Materialflüsse. Zudem sind die geplanten Kraftwerksbauten in den UBA- und BDEW-Veröffentlichungen zu spekulativ, um sie in diese Untersuchung zu integrieren. Andererseits sind zurzeit neun größere Steinkohlekraftwerke und drei Braunkohlekraftwerke im Bau. Für diese Studie werden daher die aktuellen Bauprojekte der großen Kraftwerksneubauten (>100 MW) als Referenzpunkt für die jährlichen Materialflüsse für Neubau und Erweiterung ausgewählt.

Kraftwerksneubauten sind mehrjährige Projekte – entsprechend liegt den Berechnungen eine geschätzte Bauzeit von vier Jahren zugrunde. Es werden also nur 25 % der hochgerechneten Materialbedarfe für den jährlichen Neubau der Kraftwerke angerechnet. Methodisch wird der jährliche Bedarf analog zum Bestand ermittelt. Für die Abschätzung der Materialflüsse werden die spezifischen Materialkoeffizienten aus Bauer (2008) verwendet. Demnach ergeben sich für den Neubau von zwölf Kohlekraftwerken mit einer Leistung zwischen 675 MW und 1.100 MW folgende Materialbedarfe pro Jahr:

Tab. 129: Materialbedarf für den aktuellen Neubau von Kohlekraftwerken (3 BKW, 9 SKW) pro Jahr

in Tonnen		Steinkohle- kraftwerk	Braunkohle- kraftwerk
Mineralische Rohstoffe	Beton	926.096	394.594
	Ziegelsteine/Mauerwerk		14.465
	Sand/Kies/Schotter		162.617
	Asphalt/Bitumen	648	592
	Keramik/Fliesen	760	27
Metallische Rohstoffe	Stahl unlegiert	70.331	115.988
	Stahl legiert/rostfrei	72.078	6.990
	Gusseisen	1.905	1.204
	Aluminium	4.595	3.001
	Kupfer	1.349	881
	Messing	471	308
	Zink	202	107
	Blei	135	88
Kunststoffe und sonstige Rohstoffe	Mineralwolle	7.596	1.527
	Glas	51	21
	Holz	6	4.133
	PVC	3.538	
	PE	303	1.977
	PP	152	
	Schmieröl	1.684	805
	Gummi	230	
	Epoxidharz	403	
	GFK	1.063	
	SAN	51	
Summe Mineralische Rohstoffe		927.503	572.295
Summe Metallische Rohstoffe		151.067	128.567
Summe Kunststoffe und sonstige Rohstoffe		15.078	8.462
Summe Insgesamt		1.093.648	709.325

Quelle: Eigene Berechnungen, basierend auf den spezifischen Materialkoeffizienten in Bauer (2008)

In Ökobilanzierungen wird üblicherweise die Lebensdauer konventioneller Kraftwerke mit 35 bis 40 Jahren angegeben und über diesen Zeitraum abgeschrieben. Ein Großteil des Materialbestands ergibt sich aus Betonbauten. Diese können ohne große Instandhaltungen ihre komplette Nutzungsphase überstehen. Bestandteile der Maschinen- oder Steuerungstechnik sind jedoch störungsanfällig oder werden in der Nutzungsphase der Kraftwerke modernisiert und daher schon nach 10 - 15 Jahren ausgetauscht. Diese Bauteile entsprechen allerdings nur einem Bruchteil des Materialbestandes bzw. des Bedarfs bei Neubauten. Zudem zeigen die Daten, dass etliche Kraftwerke in Deutschland schon eine deutlich längere Nutzungsphase als 35 - 40 Jahre hinter sich haben.

In einer Studie der IER / DLR / LEE / FfE (2004) werden für verschiedene Kraftwerkstypen die Ersatzteile über die Nutzungsdauer mit einem Gesamtgewicht mit einigen hundert Tonnen angegeben. Der Materialbedarf der Instandhaltung von konventionellen Kraftwerken liegt also im Bereich von 0,1 % der zur Erstellung notwendigen Materialmengen. Wenn man das Verhältnis zwischen Herstellungs- und Instandhaltungsaufwand materialspezifisch betrachtet, resultieren bei Kupfer oder anderen Metallen Werte um höchstens 2 - 3 %.

Um Überschätzungen bei den Energieerzeugungsinfrastrukturen zu vermeiden, werden nur 10 % des Materialbestandes der Bautechnik in konventionellen Kraftwerken in die jährliche Abschreibung einbezogen. Der Materialbestand der Maschinen- und Elektrotechnik wird dagegen vollständig abgeschrieben. Die Anteile der einzelnen Stoffkategorien in der Bau-, Ma-

schinen- und Elektrotechnik werden den Daten der FfE (1996) entnommen. Als technische Lebensdauer wird ein Zeitraum von 40 Jahren verwendet.

Tab. 130: Jährlicher Materialbedarf für Instandhaltung, abgeleitet über die technische Lebensdauer von 40 Jahren

in Tonnen		Steinkohle- kraftwerke	Braunkohle- kraftwerke
Mineralische Rohstoffe	Beton	36.313	30.044
	Ziegelsteine/Mauerwerk	0	1.101
	Sand/Kies/Schotter	0	12.381
	Asphalt/Bitumen	24	45
	Keramik/Fliesen	284	4
Metallische Rohstoffe	Stahl unlegiert	18.251	8.831
	Stahl legiert/rostfrei	26.778	5.322
	Gusseisen	709	917
	Aluminium	456	880
	Kupfer	502	415
	Messing	176	235
	Zink	75	81
	Blei	50	67
	sonstige NE Metalle	0	0
Kunststoffe und sonstige Rohstoffe	Mineralwolle	2.711	847
	Glass	2	2
	Holz	0	315
	PVC	1.263	0
	PE	113	1.505
	PP	38	0
	Schmieröl	627	613
	Gummi	85	0
	Epoxidharz	150	0
	GFK	395	0
	SAN	19	0
	Sonstige	0	0
Summe Mineralische Rohstoffe		36.620	43.575
Summe Metallische Rohstoffe		46.998	16.747
Summe Kunststoffe und sonstige Rohstoffe		5.403	3.281
Summe Insgesamt		89.021	63.603

Quelle: Eigene Berechnungen, basierend auf Annahmen abgeleitet aus FfE (1996)

Aus dem Neubau und der Instandhaltung konventioneller Kraftwerke mit Kohlefeuerung ergeben sich nach unserer Abschätzung jährliche Materialflüsse von insgesamt rund 2 Mio. Tonnen. 92 % (oder 1,8 Mio. Tonnen) ergeben sich dabei durch die aktuellen Neubauten an Kohlekraftwerken. Während es bei der Instandsetzung nur geringe Unterschiede in der Dimension der Materialflüsse zwischen Braun- und Steinkohlekraftwerken gibt, sind die Aufwendungen für Neubau durch die größere Anzahl an Neubauten bei Steinkohlekraftwerken um ein Drittel höher als bei Braunkohlekraftwerken.

5.2.2 Materialbestand und Materialflüsse der Erdgaskraftwerke

Kraftwerke mit Erdgaseinsatz sind entweder als Dampfkraftwerke (DKW), Gasturbinenkraftwerke (GT) oder Gas- und Dampfkraftwerk (GuD) konstruiert. In der UBA-Kraftwerksdatenbank sind 83 Erdgas-Kraftwerke mit einer Leistung von >100 MW gelistet. Die um die Zu- und Abgänge bereinigten Daten des BMWi geben einen Gesamtbestand von

429 Gaskraftwerken mit einer Leistung von >1 MW für Deutschland an. Der UBA-Datensatz umfasst allerdings einen höheren Bestand an Gas-Kraftwerken mit höherer Leistung als die Daten des BMWi. Während laut UBA-Datenbank der Bestand der 83 leistungsstärksten Gaskraftwerken eine Leistung >100 MW besitzen, ergibt sich aus den Daten des BMWi ein Bestand von 82 Gaskraftwerken mit einer Leistung >50 MW. Analog zur Vorgehensweise bei den Kohlekraftwerken werden die anlagengenauen UBA-Daten mit den Daten der kleineren Kraftwerke aus der Zusammenstellung des BMWi ergänzt. Konkret werden zusätzlich zu den Gaskraftwerken der UBA-Datenbank der Materialbedarf für 235 Gaskraftwerke mit einer Leistung von 5 MW und 102 Gaskraftwerke mit einer Leistung von 30 MW abgeschätzt. Das methodische Vorgehen ist identisch mit der Abschätzung des Materialbestandes und der Materialflüsse im Bestand der Kohlenkraftwerke.

Für Gaskraftwerke können wiederum Daten von Ecolnvent (Faist-Emmenegger et al. 2007), Salzer (2008), FfE (1996) und Bauer (2008) verwendet werden. Die Ecolnvent-Daten beruhen wiederum auf älteren Studien von Jenssch (1988) und Fritsche et al. (1989).⁷⁶ Der Materialbestand bei Faist-Emmenegger et al. (2007) bezieht sich auf eine Kraftwerksgröße von 100 MW. Bei Salzer (2008) und FfE (1996) wird der Materialbestand eines 350 MW GuD-Kraftwerk abgeschätzt, bei Bauer (2008) ein 400 MW Gaskraftwerk. Die Koeffizienten sind - wie auch in anderen Fällen - in bestimmten Stoffgruppen recht identisch und gehen bei anderen Materialarten zum Teil deutlich auseinander. Wie schon bei den Kohlekraftwerken sind die Daten des Stahl- und Betonaufwandes bei den Ecolnvent-Abschätzungen niedriger geschätzt als bei der FfE (1996) oder Bauer (2008). Es wird bei der Abschätzung des Materialbedarfs nicht zwischen DKW, GT und GuD unterschieden.

⁷⁶ Inwieweit diese Daten noch den Stand der heutigen Technik und die Situation der deutschen Erdgaskraftwerke abbilden, sollte bei Nachfolgearbeiten, die sich speziell diesen Anlagen widmen, überprüft werden. Auch Manstein und Salzer beziehen sich auf Studien aus den Jahren 1993 bzw. 1996 und damit auf einen knapp 20 Jahre alten Technikstand. Für die Größenordnung der in dieser Studie ermittelten Materiallager dürften die verwendeten Daten ausreichend sein.

Tab. 131: Materialbestand der Gaskraftwerke in Deutschland

in Tonnen		nach Faist- Emmenegger et al. (2007)	nach Salzer (2008)	nach FfE (1996)	nach Bauer (2008)
Mineralische Rohstoffe	Beton	1.024.330	2.487.659	2.477.781	921.897
	Ziegelsteine/Mauerwerk		17.560	17.560	
	Sand/Kies/Schotter			11.560	
	Asphalt/Bitumen		8.195	8.195	
	Keramik/Fliesen				269
Metallische Rohstoffe	Stahl unlegiert	140.845	248.766	540.627	563.382
	Stahl legiert/rostfrei		2.427.662	97.019	115.237
	Gusseisen			33.071	
	Aluminium	19.206	21.950	3.439	28.169
	Kupfer	19.206		14.487	28.169
	Messing			439	
	Zink			219	
	Blei			366	
	sonstige NE Metalle		43.900		512
Kunststoffe und sonstige Rohstoffe	Mineralwolle	38.412	3.658	9.146	42.254
	Holz			1.829	
	PVC			5.487	
	PE	38.412	29.267		83.227
	PP			3.000	
	Gummi			439	
	Sonstige	17.756	2.195	146	
Summe Mineralische Rohstoffe		1.024.330	2.513.413	2.515.096	922.166
Summe Metallische Rohstoffe		179.258	2.742.278	689.667	735.469
Summe Kunststoffe und sonstige Rohstoffe		94.581	35.120	20.048	125.480
Summe Insgesamt		1.298.168	5.290.811	3.224.810	1.783.115

Quelle: Eigene Berechnungen, basierend auf spezifischen Materialkoeffizienten in Faist-Emmenegger et al. (2007), Salzer (2008), FfE (1996) und Bauer (2008)

Gaskraftwerke sind pro Anlage deutlich weniger ressourcenaufwändig als Kohle- und Kernkraftwerke. Der Grund liegt vor allem an der einfacheren Konstruktion. So benötigt ein Gaskraftwerk im Gegensatz zu einem Kohlekraftwerk z.B. keine Aufbereitung und Lagerung des Brennstoffs, die Entschwefelung erfolgte schon vor Einspeisung ins das Gasnetz und es muss anschließend keine Asche entsorgt werden. Im Gegensatz zu Kernkraftwerken benötigen Gaskraftwerke kein großes Reaktorgebäude aus Stahlbeton oder enorme Sicherheitsbehälter aus zentimeterdickem Stahl.

Jährlicher Materialbedarf für Ausbau, Erneuerung und Instandhaltung von Erdgaskraftwerken

Für die Abschätzung der jährlichen Materialbedarfe für Neubau und Instandsetzung werden die Koeffizienten der FfE-Studie (1996) verwendet. Zum einen weil sie in der Bestandschätzung den mittleren Wert zwischen Bauer (2008) bzw. Faist-Emmenegger et al. (2007) am unteren Ende der Abschätzung und Salzer (2008) am oberen Ende der Abschätzung bildet. Zudem sind die Daten der FfE hinsichtlich der einzelnen Materialkategorien am detailliertesten.

Die jährlichen Inbetriebnahmen an Gaskraftwerken waren im Zeitraum 2001 bis 2009 sehr unterschiedlich. Wurde laut BDEW-Unterlagen im Jahr 2003 kein einziges Gaskraftwerk in Betrieb genommen, waren es im Jahr 2005 zehn Inbetriebnahmen und drei Erweiterungen.

Ebenfalls sehr unterschiedlich sind die Leistungsklassen der in Betrieb genommenen Anlagen. Diese reichen von kleinen Anlagen der Stadtwerke mit 12 MW bis zu großen Gaskraftwerken mit 850 MW. Der Bau von drei Gaskraftwerken mit einer Leistung von jeweils 150 MW sollte eine realistische Annahme für die Abschätzung des Materialbedarfs des Neubaus von Gaskraftwerken darstellen. Der Materialbedarf für Instandhaltung wird wie bei den Kohlekraftwerken über eine technische Lebensdauer von 40 Jahren abgeschätzt. Wobei auch bei Gaskraftwerken der Materialbestand der Bautechnik nur mit 10 % in die Berechnung einfließt.

Tab. 132: Jährlicher Materialbedarf für Neubau und Instandhaltung von Erdgaskraftwerken

in Tonnen		Neubau	Anteil an der Abschreibung über die Lebensdauer in %	Instandhaltung
Mineralische Rohstoffe	Beton	43.541	10,0	6.194
	Ziegelsteine/Mauerwerk	309	10,0	44
	Sand/Kies/Schotter	203	10,0	29
	Asphalt/Bitumen	144	10,0	20
Metallische Rohstoffe	Stahl unlegiert	9.500	10,0	0
	Stahl legiert/rostfrei	1.705	77,4	10.460
	Gusseisen	581	100,0	2.425
	Aluminium	60	100,0	827
	Kupfer	255	100,0	86
	Messing	8	100,0	362
	Zink	4	100,0	11
	Blei	6	100,0	5
Kunststoffe und sonstige Rohstoffe	Mineralwolle	161	64,0	6
	Holz	32	100,0	0
	PVC	96	100,0	229
	PP	53	100,0	46
	Gummi	8	100,0	137
	Sonstige	3	100,0	0
Summe Mineralische Rohstoffe		44.196		6.288
Summe Metallische Rohstoffe		12.119		14.177
Summe Kunststoffe und sonstige Rohstoffe		352		417
Summe Insgesamt		56.668		20.882

Quelle: Eigene Abschätzung auf Basis der Daten von FfE (1996)

5.2.3 Materialbestand und Materialflüsse von Blockheizkraftwerken (BHKW)

Die Fernwärmenachfrage wird zu großen Teilen durch Heizkraftwerke (HKW), in zunehmendem Maß auch durch Nahwärmenetze mit dezentralen Block-Heiz-Kraftwerken (BHKW) befriedigt. Weiterhin sorgen Kleinkraftwerke oder Industrieunternehmen für ein Angebot an Wärmeleistung. Die in der UBA-Kraftwerksdatenbank gelisteten größeren HKW werden in dieser Studie nicht separat in ihrem Materialbestand erfasst, da diese in den Kohle- und Gaskraftwerken über die Ergänzung der UBA-Daten durch Daten des BMWi/BDEW miterfasst sind.

Es wird daher in diesem Kapitel nur der Materialbedarf für den Bestand an BHKW abgeschätzt. Es gibt wenige konkrete Zahlen wie hoch der Bestand an BHKW ist, zumal nur größere Anlagen genehmigungspflichtig sind. Das Öko-Institut (Gores 2010) gibt in einer aktuellen Präsentation von Dez. 2010 den Bestand an BHKW mit insgesamt 33.000 Anlagen und

einer Gesamtleistung von 3.500 MW_{el.} an. Über Marktbefragungen schlussfolgert Gores (2010), dass in den Jahren 2006 bis 2010⁷⁷ der Bestand rasant um jährlich 3.800 bis 6.500 Anlagen anwuchs. Insgesamt ist laut Gores in den Jahren 2006 bis 2010 der Bestand um 20.070 Anlagen oder 2.100 MW_{el.} gestiegen. Zwei Drittel der installierten Leistung (rund 2.400 MW_{el.}) wird von Anlagen <1 MW_{el.} beigesteuert. Der starke Anstieg der BHKW seit 2006 ist vor allem auf die Zunahme der Biogasanlagen mit Stromeinspeisung zurückzuführen. Aus der Präsentation von Gores (2010) geht hervor, dass die installierte Leistung von BHKW mit fossilem Brennstoffeinsatz seit 2001 wieder rückgängig ist und seit 2003 die Wachstumsdynamik allein auf die Zunahme von BHKW mit biogenem Brennstoffeinsatz, und dabei vor allem Biogas, zum Teil auch Pflanzenölen, zurückgeführt werden kann. 33.000 BHKW mit einer Gesamtleistung von 3.500 MW_{el.} ergibt ziemlich genau eine durchschnittliche Leistung von 100 kW_{el.}

Heck (2007) ermittelte für Ecolinvent in einer Studie zur Wärme-Kraft-Kopplung den Materialbedarf für zwei kleine BHKW (160 kW_{el.} und 35 kW_{el.}) und gibt für größere BHKW einen Skalierungsfaktor an. Heck schätzt, dass der Motor und der Generator des BHKW linear mit der Leistung wachsen, die restlichen Bauteile jedoch mit einer Proportionalität von $P^{2/3}$. Das heißt, das Gewicht nimmt mit zunehmender Leistung nicht im selben Maße sondern schwächer zu. Diese Annahme wurde in dieser Studie übernommen und die Werte der Referenzanlage aus Heck (2007) mit Hilfe des Skalierungsfaktors für verschiedene BHKW bis zu einer Leistung von 1.000 kW_{el.} hochgerechnet.

In der untenstehenden Tabelle wird der Materialbedarf für unterschiedliche Leistungsklassen von BHKW dargestellt. Die 160 kW_{el.} – Anlage stellt die Referenzanlage dar, die restlichen größeren Anlagen werden mittels des Korrekturfaktors geschätzt bzw. das BHKW mit 200 kW_{el.} und Dieselmotor um spezifische Materialbedarfe nach Heck (2007) ergänzt.

⁷⁷ Die Daten für 2010 sind in dieser Befragung Prognosen.

Tab. 133: Spezifischer Materialbedarf pro BHKW nach verschiedenen Leistungsklassen

	Material in kg	Lambda1-Motor	Mini-BHKW	Mager-motor	Mager-motor	Mager-motor	Mager-motor	Diesel-motor
	Leistung in kW	160	2-5	50	200	500	1000	200
metallische Rohstoffe	Gusseisen	1.595		498	1.994	4.984	9.969	1.994
	Chromstahl 18/8	236	308	94	283	603	1.086	483
	Stahl, unlegiert/niedriglegiert	6.900	437	3.133	8.033	15.044	24.268	11.113
	Aluminium	87	29	40	101	187	297	101
	Kupfer	272	29	88	339	834	1.652	339
	Zinn	3		1	3	6	9	3
	Blei	1	0	1	1	3	4	1
	Nickel	1	0	0	1	1	2	1
	Zink	0	0	0	0	1	1	0
	Palladium	0		0	0	0	0	0
	Platin	0		0	0	0	0	0
	Rhodium	0		0	0	0	0	0
	Titanoxid							0
Kunststoff und sonstiges	PVC	12	5	6	14	26	41	14
	PE	126	13	58	146	269	427	216
	Polyester		50					
	Mineralwolle	571	26	263	663	1.220	1.937	663
	Acrylharzlack	4	1	2	5	9	14	5
	Gummi	10		5	12	21	34	12
	Zeolith	8	0	4	9	17	26	9
Mineralische Rohstoffe	Beton	5.750		2.648	6.672	12.290	19.510	8.627
Summe metallische Rohstoffe		9.095	804	3.855	10.756	21.663	37.289	14.036
Summe Kunststoff und sonstige		723	94	333	839	1.546	2.453	909
Summe Mineralische Rohstoffe		5.758	0	2.652	6.681	12.307	19.536	8.636
Summe Insgesamt		15.576	899	6.840	18.276	35.516	59.279	23.582

Quelle: Eigene Berechnung auf Grundlage von Heck (2007)

Bei geschätzten 33.000 BHKW und einer installierten Bruttoleistung von 3.500 MW wird die 160 kW_{el.} mit Lambda1-Motor als Referenzanlage gewählt, um den Materialbedarf abzuschätzen. Danach ergibt sich aus dem Bestand von 33.000 BHKW ein Materialbestand von rund 514.000 Tonnen. Den größten Anteil an diesem Materialbestand haben metallische Rohstoffe mit 300.000 Tonnen, gefolgt von Beton mit 189.750 Tonnen. Geht man von den Zuwächsen der letzten vier Jahre aus, werden pro Jahr rund 5.000 neue BHKW in Betrieb genommen. Auch hier werden die spezifischen Materialkoeffizienten eines 160 kW_{el.} BHKW als Referenzanlage verwendet. Die jährliche Instandhaltung wird über eine technische Lebensdauer von 10 Jahren pro BHKW abgeschätzt.

Tab. 134: Materialbestand und jährlicher Materialbedarf für BHKW

		Bestand	Neubau	Instandhaltung
in Tonnen	160 kWel.	33.000 BHKW	5000 BHKW	10 Jahre technische Lebensdauer
metallische Rohstoffe	Gusseisen	52.635	7.975	5.264
	Chromstahl 18/8	7.788	1.180	779
	Stahl, unlegiert/niedriglegiert	227.690	34.499	22.769
	Aluminium	2.886	437	289
	Kupfer	8.986	1.362	899
	Zinn	86	13	9
	Blei	41	6	4
	Nickel	18	3	2
	Zink	13	2	1
	Palladium	0,5	0,1	0,1
	Platin	2,2	0,3	0,2
	Rhodium	0,3	0,0	0,0
Kunststoff und sonstiges	PVC	396	60	40
	PE	4.155	629,5	415
	Mineralwolle	18.843	2855	1.884
	Acrylharzlack	139	21	14
	Gummi	330	50	33
	Zeolith	257	39	26
Mineralische Rohstoffe	Beton	189.750	28750	18.975
Summe metallische Rohstoffe		300.147	45.477	30.014
Summe Kunststoff und sonstige Materialien		24.119	3.655	2.412
Summe Mineralische Rohstoffe		189.750	28.750	18.975
Summe Insgesamt		514.016	77.881	51.402

Quelle: Eigene Berechnung auf Grundlage von Heck (2007)

5.2.4 Materialbestand und Materialflüsse der Kernkraftwerke

Der Materialbestand und der jährliche Materialbedarf der 17 noch im Betrieb befindlichen Kernkraftwerke (11 Druckwasser- und 6 Siedewasserreaktoren) wird zum einen mit den Daten des EcoInvent-Reports „Kernenergie“ (Dones 2007) und zum anderen mit den Angaben der FfE-Studie von 1996 berechnet. Die Zahlen bei Dones beruhen auf je einem Schweizer 1.000 MW-Reaktor jeder Bauart. Für die Kraftwerke der 1.300 MW-Klasse werden die Daten mit einem Korrekturfaktor von 1,2 hochgerechnet. Der Zuwachs an Material verläuft demnach nicht linear zum Zuwachs an Leistung. In der Studie der Forschungsstelle für Energiewirtschaft (FfE 1996) ist nur der Materialbedarf für ein Kraftwerk mit einem 1.400 MW Druckwasserreaktor abgeschätzt. Die Daten der einzelnen Materialkategorien sind in Dones (2007) und FfE (1996) häufig recht identisch. Allerdings analysiert die FfE-Studie den Materialbedarf eines DWR in größerer Detailtiefe. Ein Teil der höheren aggregierten Materialbestandswerte der FfE erklärt sich aus diesem Umstand. Der andere Faktor für die höheren Materialbestände pro MW liegt in einer höheren Abschätzung des Betonbedarfs in der Studie der FfE (1996). Für die Abschätzung werden die Kernkraftwerke entweder der 1.000 MW-Klasse oder der 1.300 MW-Klasse zugerechnet.

Tab. 135: Materialbestand der deutschen Kernkraftwerke

in Tonnen		nach Dones (2007)	nach Dones (2007)	nach FfE (1996)
		Siedewasser- reaktor	Druckwasser- reaktor	Druckwasser- reaktor
mineralische Rohstoffe	Beton	3.039.036	5.059.080	7.766.383
	Mauerwerk			68.946
	Asbestzement	34.980	68.900	89.705
	Bitumen			9.591
	Dachpappe			1.725
metallische Rohstoffe	Stahl unlegiert, niedriglegiert	435.864	795.093	964.977
	Stahl legiert, rostfrei			54.496
	Gusseisen			6.941
	Aluminium	1.320	2.600	2.272
	Kupfer	9.722	19.149	21.958
	Blei			1.104
	Titan	862		
Kunststoff und sonstiges	PP			1.336
	PE			421
	PVC			6.310
	Polystyrol-Hartschaum			326
	Mineralwolle			35.020
	Glas			578
	Schmieröl			5.363
Summe Mineralische Rohstoffe		3.074.016	5.127.980	7.936.349
Summe Metallische Rohstoffe		447.768	816.842	1.051.748
Summe Kunststoffe und sonstige Rohstoffe				49.354
Summe Insgesamt		3.521.784	5.944.822	9.037.451

Quelle: Eigene Berechnung basierend auf spezifische Materialkoeffizienten in Dones (2007) und FfE (1996)

Der Materialbestand von Kernkraftwerken wird zu 85 % durch Beton bestimmt. Die enorme Menge an Beton ergibt sich vor allem aus den materialaufwändigen Baumaßnahmen der Reaktorkuppel. Auch der hohe Anteil an Baustahl erklärt sich aus dem immensen Materialaufwand für die Schutzhülle des Reaktors.

Jährliche Materialflüsse für die Instandhaltung der deutschen Kernkraftwerke

In Deutschland wurden 1988 die letzten Kernkraftwerke (KKW) in Betrieb genommen. Ein Neubau eines Kernkraftwerkes ist zurzeit nicht angedacht, allerdings wurden vor wenigen Monaten die Laufzeiten der bestehenden KKW's verlängert. Somit fällt kein Materialbedarf für den Neubau an, allerdings für die Instandsetzung und Modernisierung. Laut FfE (1996) werden in 40 Betriebsjahren 30 % der Maschinentechnik und 50 % der Elektrotechnik ausgewechselt. Die Gebäudebestandteile, die den Großteil des Materialbestandes von KKW ausmachen, müssen vermutlich nur wenig instand gehalten werden. Um die jährlichen Materialbedarfe der Energieerzeugung aus Kernenergie mit denen der anderen konventionellen Kraftwerke vergleichen zu können, wird in dieser Studie der jährliche Instandhaltungsaufwand, mit Ausnahme der Bautechnik, komplett über die technische Lebensdauer abgeschätzt. Der Materialbestand der Bautechnik wird analog zu Kohle- und Gaskraftwerken nur mit 10 % in die jährliche

Abschreibung einbezogen. Die in der FfE-Studie (1996) angegebene Lebensdauer von 40 Jahren wird für Deutschland als realistisch angesehen, auch wenn in anderen Ländern schon Betriebsgenehmigungen für 60 Jahre ausgestellt wurden. Je nachdem, ob man die Daten von Dones oder FfE verwendet, kommt man auf einen jährlichen Materialbedarf von 27.220 Tonnen (Dones) oder 37.403 Tonne (FfE).

Tab. 136: Jährlicher Materialbedarf für Instandhaltung, abgeleitet aus der technischen Lebensdauer

in Tonnen		nach Dones (2007)	nach Dones (2007)	nach FfE (1996)
		SWR	DWR	DWR
mineralische Rohstoffe	Beton	7.689	12.799	19.649
	Mauerwerk			172
	Asbestzement	875	1.723	2.243
	Bitumen			24
	Dachpappe			4
metallische Rohstoffe	Stahl unlegiert, niedriglegiert	1.193	2.177	2.642
	Stahl legiert, rostfrei			1.362
	Gusseisen			174
	Aluminium	15	30	26
	Kupfer	235	463	531
	Blei			28
	Titan	22		
Kunststoff und sonstiges	PP			33
	PE			11
	PVC			158
	Polystyrol-Hartschaum			1
	Mineralwolle			182
	Glass			1
	Schmieröl			134
Summe Mineralische Rohstoffe		8.563	14.522	22.092
Summe Metallische Rohstoffe		1.465	2.670	4.762
Summe Kunststoffe und sonstige Rohstoffe				520
Summe Insgesamt		10.028	17.192	27.375

Quelle: Eigene Berechnung auf Basis von Dones (2007) und FfE (1996)

Gleichzeitig wurden mit den KKWs Stade und Obrigheim die ersten beiden KKW im Rahmen der früheren Vereinbarung über den Ausstieg aus der Atomenergie abgeschaltet und werden zurzeit zurückgebaut. Dies betrifft aktuell neben diesen beiden KKW zusätzlich noch die KKW Mühlheim-Kärlich, Greifswald und Würgassen. Der Rückbau erfolgt in mehreren Phasen und dauert zehn und mehr Jahre. Das KKW Gundremmingen A wurde z.B. über 20 Jahre (1985 - 2005) zurückgebaut. In Greifswald werden seit 1995 die beiden genutzten sowie die vier fertig gestellten, jedoch nie genutzten, Kraftwerksblöcke für geschätzte 5 Mrd. Euro zurückgebaut. Laut Kraftwerksbetreiber (E.ON 2006) können 99 % der Rückbaumassen für die Verwertung bzw. Wiederverwendung freigegeben werden. Die Menge an radioaktiven Abfällen, die konditioniert und sicher eingelagert werden müssen beträgt z.B. im KKW Stade rund

3.000 t von ca. 330.000 t Rückbaumasse. Für die sichere Einlagerung der radioaktiven Abfälle entsteht ein zusätzlicher Materialbedarf für Stahl und Beton (Stahl für Fässer und Container und Beton für die Verfüllung). Laut Dones (2007) sind dies Mengen von 3.000 - 5.300 t Beton und 400 - 700 t Stahl pro KKW der Klasse 970 MW. Über eine betrachtete Zeitspanne des Rückbaus von rund 13 Jahren ist dieser jährliche Materialbedarf allerdings zu vernachlässigen.

Während die Menge dieser Abfälle als solche relativ klein ist, ist der ressourcenbezogene Aufwand für die sichere Zwischen- und Endlagerung dieser Abfälle wie auch bei den Abfällen aus Kernbrennstoffen noch nicht untersucht.

Aus den Rückbaumassen, die E.ON für das KKW Stade angibt, wird mit Bezug zur Kraftwerksleistung der drei anderen KKWs, die derzeit zurückgebaut werden, die Rückbaumenge überschlagsmäßig hochgerechnet. Gleichzeitig wird eine durchschnittliche Zeitspanne für den kompletten Rückbau von 13 Jahren unterstellt. Der Rückbau der sechs Kraftwerksblöcke in Greifswald wird wegen fehlender Informationen der gespeicherten Materialmengen in russischen Kraftwerkstypen nicht mit einbezogen. Aus diesen Annahmen ergibt sich eine jährliche Rückbaumasse von rund 110.000 t. Diese umfasst 95.000 t Beton sowie überwiegend Stahl.

5.2.5 Materialbestand und Materialflüsse der Wasserkraftanlagen

Neben vielen Kleinanlagen (ca. 7.300) mit einer Leistung von <1 MW tragen die etwa 354 größeren Wasserkraftwerke (>1 MW) zu 90 % zu der durch Wasserkraft produzierten Strommenge bei (BMU 2008). Insgesamt sind in Deutschland 4.630 MW an Wasserkraftanlagen installiert.⁷⁸ Der Anteil der Wasserkraft bei der Stromerzeugung liegt in Deutschland bei ca. 5 % (Bundesverband Deutscher Wasserkraftwerke e. V. BDW). Aufgrund des Gewässerschutzes und der topographischen Bedingungen in Deutschland ist in Zukunft nur ein begrenzter Ausbau der Wasserkraftinfrastruktur zu erwarten. Vielmehr sind über Modernisierungs- und Ausbaumaßnahmen der bestehenden Kraftwerke Potentiale von weiteren 2 TWh/a möglich (BMU 2004). Aktuell werden mit Wasserkraftanlagen in Deutschland rund 19,7 TWh Strom pro Jahr produziert (BMU 2011).

Wasserkraftanlagen (WEA) können Laufwasserkraftwerke (LWK) sein, die zumeist an Flüssen erbaut sind, sowie Speicherkraftwerke (SKW), die in Deutschland jedoch nur eine untergeordnete Rolle spielen. Die UBA-Kraftwerksdatenbank kann zur Berechnung des Materialaufwandes der Wasserkraftanlagen nicht herangezogen werden, da nur ein Bruchteil der Wasserkraftanlagen eine Leistung von >1 MW aufweisen und damit Bestandteil der UBA-Datenbank sind. Selbst die Daten des BMWi/BDEW mit Anlagen ab einer Leistung von 1 MW listen nur 320 LWK auf und damit deutlich weniger als die 7.654 vom BMU angegebenen Wasserkraftanlagen.

⁷⁸ Zusätzlich sind noch Kapazitäten von 6.000 MW PSW in Deutschland vorhanden. Allerdings muss die notwendige Leistung, die zum Hochpumpen des Wassers in das Oberbecken notwendig ist, gegen gerechnet werden. Grundsätzlich benötigen PSW mehr Energie zum Hochpumpen als sie selbst erzeugen.

Neben der unzureichenden Datenlage über den Bestand an Wasserkraftanlagen und deren individuelle Kraftwerksleistung⁷⁹ gibt es nur wenige ausführliche Sachbilanzen für Wasserkraftanlagen. Die wenigen vorhandenen Sachbilanzen mit detaillierten Daten für Wasserkraftanlagen sind wiederum meist Kraftwerke mit Leistungen über 1 MW, die für den Großteil des Bestandes an Wasserkraftanlagen nicht verwendet werden können. Die Daten in Bauer et al. (2007) beziehen sich auf die Schweizer Wasserkraftanlagen. Die Topographie der Schweiz erlaubt es, große und sehr leistungsstarke Speicherkraftwerke zu betreiben, die zudem häufig in Form von Beton-Talsperrenmauern erbaut sind. In Deutschland sind dagegen sehr häufig Speicherseen mittels Erd- oder Steinschüttdämmen errichtet. Die Mengen an gespeicherten Stahl und Beton sind somit nicht mit den Daten der Schweizer Talsperren vergleichbar. Verschiedene Projekte am Wuppertal Institut haben zudem gezeigt, dass eine Zurechnung des Materialbedarfs von Speicherkraftwerken über die Leistung in MW eigentlich nicht zulässig ist. Denn die Leistung bestimmt sich im hohen Maße über die erreichbare Fallhöhe, die wiederum nicht unmittelbar mit dem Bauaufwand verbunden sein muss. Zusätzlich sind in Bauer et al. (2007) die Materialbestände für drei größere LWK (23 MW, 40 MW und 85 MW) nach den Materialkategorien Beton, Baustahl und rostfreier Stahl abgeschätzt.

Die Daten in Manstein (1996) wiederum beziehen sich auf den Materialbedarf des deutschen Energieverbrauchs und damit auf die Infrastruktur der Herkunftsregion des deutschen Stromverbrauchs. Bei Wasserkraft ist dies zu großen Teilen Österreich oder die Schweiz, so dass sich auch die Daten in Manstein auf große Speicherkraftwerke bzw. leistungsstarke Laufwasserkraftwerke beziehen.

Neben Manstein (1995) und Bauer et al. (2007) sind in Nitsch et al. (2004) der Bauxit und Eisenbedarf für ein 3,1 MW und ein 0,3 MW Laufwasserkraftwerk abgeschätzt. Mayer-Spohn et al. (2007) gibt zusätzlich noch den Kupferbedarf für ein 3,1 MW LWK an. Marheinecke (2001) wiederum berechnet den Materialbedarf für vier LWK der Leistungsklassen 300 kW, 500 kW, 2,2 MW sowie 3,1 MW für die Materialkategorien Eisen, Kupfer, Bauxit und Kalkstein. In Nitsch et al. (2004), Mayer-Spohn et al. (2007) und Marheinecke (2001) wurden die gespeicherten Materialmengen der LWK schon in ihre Ausgangsrohstoffe zurückgerechnet, ohne dass die dahinterliegenden Koeffizienten publiziert wären. Es ist daher nur mit eigenen Annahmen möglich, den Wert z.B. für Kalkstein über den Zwischenschritt der Zementherstellung wieder in einen Wert für Beton zurückzurechnen.

Eine sehr detaillierte Umwelterklärung mit umfassender Sachbilanz liegt für das Laufwasserkraftwerk Wildegg-Brugg in der Schweiz vor (AXPO 2010). Allerdings hat dieses Kraftwerk eine Leistung von 50 MW und ist somit nur mit wenigen Laufwasserkraftwerken in Deutschland vergleichbar. In der GEMIS-Datenbank 4.5 des Öko-Instituts (Fritsche/Schmidt 2008) sind ebenfalls Stahl- und Zementangaben für verschiedene Leistungskategorien (50 MW, 100 kW, 10 kW) in kg/MW angegeben. Im

⁷⁹ Der BDEW hat Ende 2009 begonnen eine Datenbank mit detaillierten Informationen über den Bestand an Wasserkraftanlagen aufzubauen. Dieses war im Projektzeitraum noch nicht verfügbar.

Vergleich zu den anderen genannten Studien scheint der Betonwert allerdings für die Leistungsklasse der 50 MW-LWK deutlich überschätzt und für die beiden kleineren Anlagenkategorien deutlich unterschätzt. In der GEMIS-Datenbank ist bei einem 50 MW LWK ein Wert von $9,6 \cdot 10^6$ kg/MW Zement angegeben. Dies wären für ein 50 MW-Kraftwerk 480.000 Tonnen Zement. Bei einem Zementanteil von 330 kg pro m³ Beton und einer Betondichte von 2.400 kg/m³ (Bundesverband der Betonindustrie) ergibt dies rechnerisch für ein 50 MW LWK eine Betonmenge von 3,8 Mio. Tonnen. Bauer et al. geben für ähnlich große Anlagen lediglich einen Wert im Bereich von 50.000 bis 75.000 Tonnen an. Internetrecherchen zum Neubauprojekt des LWK Rheinfelden führen für das 100 MW LWK zu einer verbaute Betonmenge von 420.000 Tonnen. Weiterhin sind in Baumgartner/Boka (1998) die gespeicherten Materialmengen für vier kleinere Laufwasserkraftwerke der Schweiz (18,5 kW, 70 kW, 150 kW und 360 kW) abgeschätzt.

Da lediglich für die größeren LWK eine Verteilung nach Leistungsklassen vorliegt, müssen eigene Annahmen über eine sinnvolle Durchschnittsleistung pro LWK getroffen werden. Laut BMWi haben die großen Laufwasserkraftwerke eine summierte Leistung von rund 2.900 MW. Bei einer Gesamtleistung aller Wasserkraftanlagen von insgesamt 4.650 MW bedeutet dies für die rund 7.300 Kleinwasserkraftwerke mit einer Leistung von jeweils unter 1 MW eine Gesamtleistung von rund 1.750 MW. Pro Kleinwasserkraftwerk entspricht dies einer Leistung von 240 kW. Der Großteil der Wasserkraftanlagen >1 MW hat laut BMWi-Aufstellung eine Leistung zwischen 1 - 10 MW. Für die Abschätzung des Materialbedarfs der deutschen Wasserkraftwerke werden für die Wasserkraftwerke >10 MW (75 Laufwasserkraftwerke) der Materialbedarf eines 40 MW LWK aus Bauer et al. (2007) verwendet, für die 240 LWK der Leistungsklasse 1 - 10 MW werden die Daten eines 2,2 MW Kraftwerkes aus Marheinecke (2001) verwendet. Der Materialbestand der 7.300 Kleinwasserkraftwerke wird schließlich mit den Werten eines 150 kW Kraftwerkes aus Baumgartner/Boka (1998) hochgerechnet.

Tab. 137: Materialbestand Laufwasserkraftwerke Deutschland

	Klein-LWK	mittlere LWK	große LWK
	150 kW	2,2 MW	40 MW
	nach Baumgartner/Boka (1998)	nach Marheinecke (2001)	nach Bauer et al. (2007)
in t			
Anzahl	7.300	279	75
Beton	10.599.600	156.731	2.016.000
Stahl unlegiert, niedriglegiert	343.100	5.422	12.600
Stahl legiert, rostfrei			675
Kupfer		16	
Bauxit		28	
Kunststoff	102.200		
sonstiges	5.350.900		
Summe	16.395.800	162.197	2.029.275

Quelle: Eigene Berechnung, basierend auf spezifischen Materialkoeffizienten aus Baumgartner/Boka (1998), Marheinecke (2001), Bauer et al. (2007)

Insgesamt schätzen wir den gespeicherten Materialbedarf in deutschen Wasserkraftanlagen auf rund 18,6 Mio. Tonnen und damit in der Größenordnung der Stein- oder Braunkohlekraftwerke.

Für Speicher- und Pumpspeicherwerke liegen für Deutschland bis auf wenige im Internet verfügbare Daten keine konkreten Informationen zur verbauten Mengen an Materialien vor. Die Angaben im Internet beziehen sich dabei eher auf die leistungsstarke PSW (Goldisthal) bzw. auf PSW, bei der die Maschinentechnik in unterirdischen Kavernen untergebracht wurden (Waldeck II). Beide PSW sind eher die Ausnahme als die Regel und würden angewendet auf den Gesamtbestand der PSW den Materialbedarf deutlich überschätzen. Wir haben daher in dieser Studie die Pumpspeicherkraftwerke nicht mit in die Abschätzung des Materialbestandes der Energieerzeugung integriert.

Jährlicher Materialbedarf für die Instandhaltung von Wasserkraftanlagen

Die hier untersuchten Studien, die entweder Ökobilanzierungen durchführen bzw. Potentialabschätzungen erneuerbarer Energien an der zukünftigen Energieversorgung abschätzen (z.B. DLR / ifeu / WI 2004, Hirschberger et al. 2005), kommen übereinstimmend zum Fazit, dass das Potential zum Ausbau der Wasserkraftwerke in Deutschland weitestgehend ausgeschöpft ist. Ein Ausbau ist allenfalls bei kleinen Laufwasserkraftwerken zu erwarten. Diese sind jedoch oft Erweiterungen bestehender Anlagen bzw. Reaktivierungen alter Anlagen, so dass eine Zurechnung der Materialbedarfe schwieriger zu bewerkstelligen ist. Daher wird kein jährlicher Materialbedarf für Neubauten abgeschätzt. Die Bautechnik (Wehre u.ä.) einmal erstellter Wasserkraftanlagen wird als wartungsarm eingeschätzt. Wenn Instandhaltungen vorzunehmen sind dann im Bereich der Maschinentechnik. Eine trennscharfe Aufteilung z.B. der Stahlmenge in Bewehrungsstahl und Maschinentechnik ist nicht möglich. Aus diesem Grund wird der Instandhaltungsaufwand auch bei Wasserkraftanlagen über die technische Lebensdauer abgeschätzt. In dieser Studie wird für die verschiedenen Leistungsklassen der Wasserkraftanlagen einheitlich von 80 Betriebsjahren ausgegangen. Für Beton und Armierungsstahl werden zudem nur 10 % der Materialmenge in die jährliche Abschreibung über die technische Lebensdauer mit einbezogen. Daraus ergibt sich folgender jährlicher Materialbedarf für die Instandhaltung des Anlagenbestandes von Laufwasserkraftwerken:

Tab. 138: Jährlicher Materialbedarf für die Instandhaltung des Bestandes an LWK

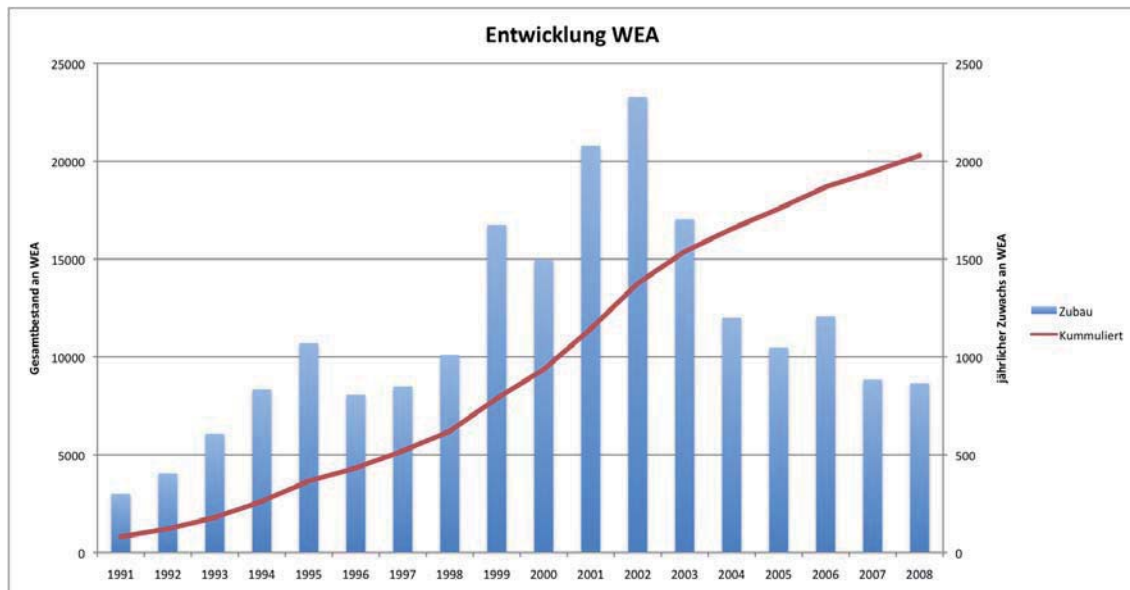
in t	Klein-LWK	mittlere LWK	große LWK
	150 kW	2,2 MW	40 MW
	Baumgartner/Boka (1998)	Marheinecke (2001)	Bauer et al. (2007)
Anzahl	7.300	279	75
Beton	13.250	196	2.520
Stahl unlegiert, niedriglegiert	429	7	16
Stahl legiert, rostfrei			8
Kupfer		0,2	
Bauxit		0,4	
Kunststoff	1.278		
Sonstiges	66.886		
Summe	81.842	203	2.544

Quelle: Eigene Berechnung, basierend auf spezifischen Materialkoeffizienten aus Baumgartner/Koka (1998), Marheinecke (2001), Bauer et al. (2007)

5.2.6 Materialbestand und Materialflüsse der Windenergieanlagen

Bereits in den 80er Jahren des letzten Jahrhunderts stellte Deutschland erste Förderprogramme für die Nutzung von Windkraft auf. 1992 gab es in Deutschland rund 2.000 Windenergieanlagen. Seitdem wächst die Zahl der Windenergieanlagen, wenn auch mit nachlassender Dynamik. Nach der aktuellen Liste für Windenergieanlagen (WEA), die vom ISET zur Verfügung gestellt wurde, waren zum Stichtag 01.02.2009 20.023 WEA mit einer Gesamtleistung von 23.712 MW installiert. Wenn die jährlich neugebauten WEA betrachtet werden, wird deutlich, dass die durchschnittliche Leistung pro WEA in den letzten Jahren immer stärker angestiegen ist. Wurden früher vor allem Anlagen mit einer Leistung von 1 - 1,5 MW gebaut, sind die Anlagen, die im Jahr 2007 oder 2008 erstellt wurden, häufig Anlagen im Bereich >2,5 MW. Vereinzelt werden schon WEA mit einer Leistung von 6 MW in Deutschland zugelassen und gebaut.

Abb. 10: Windenergieanlagen in Deutschland



Quelle: Eigene Darstellung nach ISET (jetzt Fraunhofer IWES) (2009)

Der typische Aufbau einer Windenergieanlage lässt sich grob in die vier Baugruppen Fundament, Turm, Gondel und Rotor unterscheiden. Für das Fundament wird Beton und Stahl benötigt. Der Turm besteht aus Stahl oder aus Beton. Üblich ist laut dem Bundesverband Windenergie e.V. die Stahlturmvariante. Weitere Varianten sind möglich und werden in anderen Ländern ebenfalls angewendet. Zu erwähnen ist hier die Gitterturmvariante. Diese ist mit weniger Materialaufwand verbunden, aber aufgrund einer arbeitsintensiveren Produktion gerade in Ländern mit hohen Personalkosten teurer. Eine Windenergieanlage besteht weiter aus einer Gondel, in welcher weitere Bauteile (Getriebe, Kupplung, Bremse, Generator, Rotorwelle, Kühlung) einer Windenergieanlage untergebracht werden.

Für die Zukunft ist ein weiterer Ausbau zur Nutzung der Windenergie in Deutschland absehbar. Es soll laut DENA Netzstudie bis zum Jahr 2015 insgesamt 37.000 MW installiert sein (DENA 2005). Bei den Ausbauplanungen sind geplante oder schon begonnene Offshore-Anlagen in Ost- und Nordsee zu berücksichtigen. Es ist allerdings aufgrund der technischen Herausforderungen noch nicht absehbar, wie viele Anlagen mit welchem Leistungsumfang bis zum Jahr 2020 tatsächlich realisiert werden. Der Materialaufwand für Offshore-Anlagen ist aufgrund der großen Tiefe der geplanten Standorte und der deutlich höheren Belastung für die Bauteile wesentlich höher.

Im Gegensatz zu anderen Energieerzeugungsanlagen herrscht im Bereich der WEA kein Mangel an Sachbilanzen und LCA-Studien. So haben Burger/Bauer (2007) für Eco-Invent LCA-Daten für Windenergieanlagen zusammengetragen. Dabei werden jedoch nur kleine Anlagentypen (30 kW, 150 kW, 600 kW und 800 kW) detailliert dargestellt. Selbst die 800 kW-WEA wäre für den heutigen Bestand in Deutschland zu

klein und nicht repräsentativ, da 2/3 der deutschen WEA mindestens eine Leistung von 1 MW oder mehr haben.

Über verschiedene Herstellerangaben kann zumindest das Gesamtgewicht von wichtigen Baugruppen (Rotorblätter, Rotor gesamt, Gondel, Turm) für WEA der neueren Generation mit höheren Leistungen ermittelt werden. Unter der Annahme, dass die prozentualen Anteile der einzelnen Anlagenteile (z.B. Getriebe, Generator) am Gesamtgewicht der Baugruppe (Gondel) identisch mit den kleineren Anlagen sind, ist es möglich, die Materialmenge differenziert nach verschiedenen Anlagenteilen und Materialgruppen auch für Anlagen der Leistungsklassen 1,65 MW (Vestas), 2,5 MW (Nordex) und der Kategorie 3,6 MW (Siemens) hochzurechnen. Geuder (2004) veröffentlichte in seiner Diplomarbeit zudem eine detaillierte Materialzusammensetzung zweier Enercon-Modelle (E-66 und E-112), die für die Abschätzung des Materialbestandes von WEA in Deutschland bedeutsam sind. WEA des deutschen Marktführers Enercon unterscheiden sich in ihrer Konstruktion deutlich von WEA anderer Anbieter: Enercon verzichtet in seinen WEA auf ein wartungsintensives Getriebe, was aber zur Folge hat, dass der Generator deutlich größer konzipiert werden muss, um die gleiche Leistung zu erzeugen wie bei herkömmlichen WEA. Damit ist zum Bau von Enercon-WEA ein deutlich höherer Kupferbedarf notwendig.

Für jede Leistungskategorie der ISET-Datenbank kann aus den vorhandenen Daten eine typische WEA zugeordnet und somit die WEA jeder Leistungsklasse mit klassentypischen Materialmengen abgeschätzt werden. Zudem wird der Marktanteil von Enercon (um die 50 %) in der Abschätzung mit berücksichtigt.

Tab. 139 weist die Gesamtmengen an Materialien aus, die in den ca. 20.000 WEA in Deutschland verbaut sind. Die große Menge an Beton ist für die zum Teil 100 m hohen Stahl- oder Betonmasten der WEA notwendig. Zum einen für den Mast selbst⁸⁰ zum anderen für die enorm großen Fundamente, die notwendig sind, um der WEA die notwendige Standfestigkeit zu verschaffen. Da konkrete Daten zur Verteilung von Stahl- und Betonmasten fehlen, wird in dieser Abschätzung angenommen, dass alle WEA mit Ausnahme der großen Enercon-Anlagen (Enercon E-112) in Deutschland mit einem Stahlrohrmast gebaut sind.

⁸⁰ Enercon baut zum Beispiel die Masten seiner größeren WEA sehr häufig aus Beton-Fertigteilen, die übereinander gesetzt werden.

Tab. 139: Materialbestand Windenergieanlagen in Deutschland

Leistungsklassen		0-149 kW	150-499 kW	500-999 kW	1000-1499 kW	1500-2000 kW	1500-2000 kW	2000-2499 kW	2000-2499 kW	>=2500 kW	>=2500 kW	Insgesamt
Gerätetyp		150 kW Ecoinvent	600 kW Ecoinvent	800 kW Ecoinvent	1,65 MW (Vestas)	1,5 MW (Enercon)	1,65 MW (Vestas)	2,5 MW (Nordex)	2,5 MW Enercon	3,6 MW (Siemens)	4,5 MW (Enercon)	
Anzahl		800	1275	6485	980	3634	2652	2036	2036	62	63	20.023
Material		in t	in t	in t	in t	in t	in t	in t	in t	in t	in t	in t
mineralische Rohstoffe	Beton	40.800	229.500	1.459.125	401.800	2.089.550	1.087.320	1.966.776	1.951.166	124.000	466.200	9.816.237
	Leichtbeton	0	0	0	0	43.608	0	0	40.720	0	2.268	86.596
metallische Rohstoffe	Stahl unlegiert, niedrig legiert	14.147	67.337	564.993	155.980	818.635	422.100	523.425	542.140	24.332	34.051	3.167.139
	Stahl legiert, rostfrei	2.202	22.032	90.959	19.404	72.211	52.510	129.002	10.209	5.540	5.754	409.822
	Gusseisen	726	3.910	21.264	17.640	93.674	77.704	57.937	80.905	2.572	7.627	363.958
	Aluminium	57	260	1.343	3.038	821	8.221	7.240	17.958	243	61	39.242
	Kupfer	385	1.651	9.462	2.842	55.964	7.691	4.923	36.422	176	3.944	123.459
	Zinn	0	1	3	0	0	1	1	0	0	0	7
	Blei	0	1	3	0	0	1	1	0	0	0	7
	Elektrik	0	0	0	0	3.870	0	0	3.614	0	201	7.685
	Elektronik	0	0	0	0	5.099	0	0	4.353	0	279	9.730
Kunststoffe und sonstiges	GFK	2.230	9.105	62.652	27.440	59.685	74.256	64.388	61.935	3.862	4.092	369.645
	Kunststoffe	646	1.331	6.971	1.992	7.457	5.392	4.139	2.535	126	447	31.036
	PVC-Hartschaum	0	0	0	0	3.042	0	0	0	0	196	3.237
	Gummi	396	128	649	98	600	265	940	0	39	39	3.153
	Epoxidharz/Lack	76	184	2.335	847	17.331	2.291	2.345	1.097	89	281	26.876
	Getriebeöl	0	0	0	0	3.416	0	0	3.190	0	178	6.784
	sonstiges	0	0	0	0	2.660	0	0	764	0	161	3.585
Summe Mineralische Rohstoffe		40.800	229.500	1.459.125	401.800	2.133.158	1.087.320	1.966.776	1.991.886	124.000	468.468	9.902.833
Summe Metallische Rohstoffe		17.517	95.192	688.026	198.905	1.050.273	568.228	722.530	695.599	32.863	51.918	4.121.050
Summe Kunststoffe und sonstiges		3.348	10.747	72.606	30.377	94.190	82.204	71.813	69.521	4.116	5.393	444.316
Summe Insgesamt		61.665	335.439	2.219.757	631.082	3.277.621	1.737.752	2.761.119	2.757.007	160.979	525.778	14.468.199

Quelle: Eigene Berechnung auf Grundlage von Burger/Bauer (2007), Geuder (2004), Vestas (2006) und weiteren Herstellerangaben. Daten zur Anzahl der Windenergieanlagen nach Leistungsklassen: ISET (jetzt Fraunhofer IWES), persönliche Kommunikation 2009

Der Materialbestand der 20.000 WEA beträgt nach unserer Abschätzung 14,5 Mio. Tonnen. Zu zwei Dritteln ist der Materialbestand durch den Betonverbrauch für Masten und Fundamente der WEA bestimmt. Zudem sind auch über 4 Mio. Tonnen metallische Rohstoffe, vor allem Stahl, im Bestand der 20.000 WEA gespeichert.

Jährlicher Materialbedarf für Ausbau, Erneuerung und Instandhaltung von Windenergieanlagen

Für den Zubau an WEA liegen detaillierte Daten pro Jahr sortiert nach Leistungsklassen vor. Weiterhin sind Angaben zum sogenannten Repowering alter WEA durch

neue, leistungsstärkere WEA vorhanden. Es kann somit der Materialbedarf für Neubau und Erneuerung von WEA gut abgeschätzt werden.

Der stoffliche Wartungsaufwand von WEA wird als gering eingeschätzt. Zum einen ist der Großteil der WEA unter zehn Jahre alt und damit noch in der ersten Hälfte ihrer vermuteten Nutzungsphase von 20 Jahren. Zwar zeigen Untersuchungen des Fraunhofer IWES (Hahn 2003), dass die Störanfälligkeit von WEA in den ersten beiden Jahren besonders hoch ist (Kinderkrankheiten innerhalb der Gewährleistung). Die geringen durchschnittlichen Reparaturzeiten lassen allerdings auf Reparaturen schließen, bei denen nicht das gesamte Getriebe bzw. die Rotorenblätter ausgetauscht werden müssen. Die Verteilung der Schadenshäufigkeit bestimmter Baugruppen von WEA zeigt ebenfalls an, dass überwiegend Schäden an der Regelungstechnik und der Elektronik auftreten und weniger an Rotorblättern oder gar Fundamenten. Ökobilanzierungen zu WEA rechnen häufig mit einem einmaligen Austausch der Rotorblätter und anderer Hauptbestandteile während der Nutzungsphase einer WEA. Die mit 1,8 % in den ersten 10 Jahren und 3,6 % in der restlichen Lebensdauer recht geringen jährlichen Instandhaltungskosten von WEA unterstützen die These des geringen Wartungsaufwandes von WEA (Bundesverband Windenergie 2010).

Aus Abb. 10 wird ersichtlich, dass der Zuwachs an WEA seit 2002 rückläufig ist. Die folgenden Berechnungen beziehen sich auf den durchschnittlichen Zuwachs der Jahre 2004 bis 2008 um jährlich 1.000 WEA. Die Größenverteilung des Zuwachses an WEA wird den Erhebungsdaten des deutschen Windinstitutes (DEWI 2009) für das Jahr 2008 entnommen. Aus dem Zuwachs von 1.000 WEA in der Größenverteilung des Jahres 2008 ergibt sich ein Materialbedarf von rund 1,17 Mio. Tonnen.

Tab. 140: Jährlicher Materialbedarf für den Zubau von Windenergieanlagen

Leistungsklassen		1000-1499 kW	1500-2000 kW	1500-2000 kW	2000-2499 kW	2000-2499 kW	>=2500 kW	>=2500 kW	Insgesamt
Gerätetyp		1,65 MW (Vestas)	1,5 MW (Enercon E-66)	1,65 MW (Vestas)	2,5 MW (Nordex)	2,5 MW Enercon	3,6 MW (Siemens)	4,5 MW (Enercon E-112)	
Anzahl		55	235	180	250	260	10	10	1.000
Material		in t	in t	in t	in t	in t	in t	in t	in t
mineralische Rohstoffe	Beton	22.550	135.125	73.800	241.500	249.167	20.000	74.000	816.142
	Leichtbeton	0	2.820	0	0	5.200	0	360	8.380
metallische Rohstoffe	Stahl unlegiert, niedrig legiert	8.754	52.939	28.649	64.271	69.232	3.924	5.405	233.175
	Stahl legiert, rostfrei	1.089	4.670	3.564	15.840	1.304	894	913	28.273
	Gusseisen	990	6.058	5.274	7.114	10.332	415	1.211	31.393
	Aluminium	171	53	558	889	2.293	39	10	4.013
	Kupfer	160	3.619	522	604	4.651	28	626	10.211
	Elektrik	0	250	0	0	462	0	32	744
	Elektronik	0	330	0	0	556	0	44	930
Kunststoffe und sonsti-	GFK	1.540	3.860	5.040	7.906	7.909	623	649	27.527
	Kunststoffe	112	482	366	508	324	20	71	1.883
	PVC-Hartschaum	0	197	0	0	0	0	31	228
	Gummi	6	39	18	115	0	6	6	190
	Epoxidharz/Lack	48	1.121	156	288	140	14	45	1.811
	Getriebeöl	0	221	0	0	407	0	28	657
	sonstiges	0	172	0	0	98	0	26	295
Summe Mineralische Rohstoffe		22.550	137.945	73.800	241.500	254.367	20.000	74.360	824.522
Summe Metallische Rohstoffe		11.163	67.918	38.567	88.719	88.829	5.300	8.241	308.738
Summe Kunststoffe und sonstiges		1.705	6.091	5.579	8.818	8.878	664	856	32.591
Summe Insgesamt		35.418	211.954	117.947	339.037	352.074	25.964	83.457	1.165.850

Quelle: Eigene Berechnungen, abgeleitet aus den Zuwächsen 2004-2008

In den DEWI-Erhebungen wird darüber hinaus die Anzahl der Repowering-Projekte veröffentlicht. Allerdings schwanken diese Zahlen stark, weshalb sich die Verwendung von Durchschnittszahlen anbietet. Bis Ende 2008 wurden 496 Anlagen abgebaut und 289 Anlagen durch Repowering modernisiert⁸¹. Im Durchschnitt der letzten sechs Jahre wurden in Deutschland 56 WEA abgebaut und 34 Anlagen durch Repowering ersetzt. Obwohl Repowering-Projekte durch die Novellierung des EEG seit 1.1.2009 gefördert werden, sind die Hürden zur Umsetzung solcher Projekte durch strenge Regelungen bezüglich Hausabstand oder Nabenhöhe recht hoch (Deutsche Wind-Guard 2005). Zudem rechnet sich das Repowering alter Anlagen erst ab einer Betriebsdauer von ca. 15 Jahren. Zusätzlich wird das Potenzial von Repowering dadurch reduziert, dass Anlagen, die vor 1996 außerhalb von sogenannten Vorranggebieten für Windenergienutzung errichtet wurden, zwar Bestandsschutz genießen, aber keine Genehmigung für ein Repowering erhalten. Daraus ergibt sich für die Abschätzung der Materialbedarfe für die Erneuerung von WEA, dass pro Jahr ein Abbau von ca. 60 WEA und ein Austausch von ca. 40 WEA als realistische Größe eingeschätzt wird.

⁸¹ Bei Repowering-Maßnahmen in Windparks verringert sich häufig die Anzahl der WEA, obwohl die Gesamtleistung der Anlage steigt. Deshalb ist die Anzahl der abgebauten und neu errichteten Anlagen nicht identisch.

Für den Abbau und das Repowering wird unterstellt, dass die ausgetauschten und abgebauten Anlagen ausschließlich aus dem Bestand der untersten zwei Leistungsklassen stammen und zwar zu je 50 %. Der Zubau der Anlagen bzw. durch Repowering neu errichteten WEA wird entsprechend der Verteilung der neugebauten WEA des Jahres 2008 berechnet.

Zusätzlich ergeben sich aus dem Austausch von 40 Anlagen jährliche Materialbedarfe in einer Gesamtgrößenordnung von knapp 137.000 t (Tab. 141). Weiterhin fallen durch den Abbau von 100 Anlagen geringerer Leistungsklassen Rückbaumassen von über 17.000 t an (Tab. 142). In der Literatur werden unterschiedliche Angaben über den Anteil der Verwertung beim Rückbau von WEA gemacht. Während bei Martinez et al. (2009) 100 % des Fundaments recycelt werden, bleiben laut Wagner (2004) und Kehrbaum (1995) Teile des Fundamentes nach dem Rückbau im Erdreich. Demnach würden nur die oberen 1,5 m eines WEA-Betonfundaments beseitigt, um eine landwirtschaftliche Nutzung auf diesen Flächen wieder zu gewährleisten. Wagner (2004) schätzt, dass 20 % einer WEA nicht wiederverwertet werden.

Tab. 141: Jährlicher Materialbedarf für Repowering von Windenergieanlagen

Leistungsklassen		2000-2499 kW	2000-2499 kW	>=2500 kW	>=2500 kW	Insgesamt
Gerätetyp		2,5 MW (Nordex)	2,5 MW Enercon	3,6 MW (Siemens)	4,5 MW (Enercon E-112)	
Anzahl		2036	2036	62	63	4197
Material		in t	in t	in t	in t	in t
mineralische Rohstoffe	Beton	9.660	9.583	20.000	74.000	113.243
	Leichtbeton	0	200	0	360	560
metallische Rohstoffe	Stahl unlegiert, niedrig legiert	2.571	2.663	3.924	5.405	14.563
	Stahl legiert, rostfrei	634	50	894	913	2.491
	Gusseisen	285	397	415	1.211	2.307
	Aluminium	36	88	39	10	173
	Kupfer	24	179	28	626	858
	Zinn	0	0	0	0	0
	Blei	0	0	0	0	0
	Elektrik	0	18	0	32	50
	Elektronik	0	21	0	44	66
Kunststoffe und sonstiges	GFK	316	304	623	649	1.893
	Kunststoffe	20	12	20	71	124
	PVC-Hartschaum	0	0	0	31	31
	Gummi	5	0	6	6	17
	Epoxidharz/Lack	12	5	14	45	76
	Getriebeöl	0	16	0	28	44
	sonstiges	0	4	0	26	29
Summe Mineralische Rohstoffe		9.660	9.783	20.000	74.360	113.803
Summe Metallische Rohstoffe		3.549	3.417	5.300	8.241	20.507
Summe Kunststoffe und sonstiges		353	341	664	856	2.214
Summe Insgesamt		13.561	13.541	25.964	83.457	136.524

Quelle: Eigene Berechnungen, abgeleitet aus den Daten von 2005-2008

Tab. 142: Jährliche Rückbaumengen an Windenergieanlagen im Rahmen von Repowering

Leistungsklassen		0-149 kW	150-499 kW	Insgesamt
Gerätetyp		150 kW (Ecoin-vent)	600 kW (Ecoin-vent)	
Anzahl		800	1275	2075
Material		in t	in t	in t
mineralische Rohstoffe	Beton	2.550	9.000	11.550
metallische Rohstoffe	Stahl unlegiert, niedrig legiert	884	2.641	3.525
	Stahl legiert, rostfrei	138	864	1.002
	Gusseisen	45	153	199
	Aluminium	4	10	14
	Kupfer	24	65	89
Kunststoffe und sonstiges	GFK	139	357	496
	Kunststoffe	40	52	93
	Gummi	25	5	30
	Epoxidharz/Lack	5	7	12
Summe Mineralische Rohstoffe		2.550	9.000	11.550
Summe Metallische Rohstoffe		1.095	3.733	4.828
Summe Kunststoffe und sonstiges		209	421	631
Summe Insgesamt		3.854	13.154	17.008

Quelle: Eigene Berechnungen, abgeleitet aus den Daten von 2005-2008

5.2.7 Materialbestand und Materialflüsse der Biogasinfrastuktur

Erneuerbare Energiequellen konnten in den letzten Jahren ihren Anteil an der deutschen Energieversorgung immer weiter ausbauen. In diesem Kontext ist in den letzten Jahren die Nutzung von Biomasse als Option der Strom- und Wärmerzeugung vermehrt in den Fokus der Diskussion gerückt. Traditionell wird Biomasse entweder thermisch verwertet, in den letzten Jahren vermehrt zu Biokraftstoffen umgewandelt oder in Form von Vergärung von Gülle, Bioabfällen und Nawaros (Nachwachsende Rohstoffe) zu Biogas lokal zur Stromgewinnung genutzt.

In den vergangenen Jahren sind einige Veröffentlichungen erschienen, die das Thema Einspeisung von Biogas in das Erdgasnetz thematisieren und dieser Nutzungsform große Potentiale prognostizieren (z.B. Institut für Energetik und Umwelt et al. 2006, Wuppertal Institut et al. 2005, Hornbacher/Mairitsch 2007).

Bis vor wenigen Jahren wurde das Biogas zumeist vor Ort in Blockheizkraftwerken (BHKW) mit angeschlossenem Stromgenerator verbrannt. Zum Teil konnte die dabei entstehende Abwärme in eigenen Gebäuden oder angrenzten Gebäuden genutzt werden. Häufig jedoch gab es eine räumliche Diskrepanz zwischen Entstehungs- und potentieller Verbrauchsstruktur der anfallenden Wärme. Die Aufbereitung des Biogases zu Biomethan, die Einspeisung ins Erdgasnetz und die Nutzung des Biomethans in räumlich getrennten Kraft-Wärme-Kopplungsanlagen (KWK-Anlagen) würde diese Nichtübereinstimmung zwischen Entstehung und Verbrauch aufheben. Weitere Vorteile einer Einspeisung von Biomethan in das Erdgasnetz wären die generelle Aufhebung der Grenzen räumlicher Absatzmöglichkeiten für die Betreiber von Biogasanlagen und

bei einer Verwendung dieses Biomethans in KWK-Anlagen eine deutliche Erhöhung des Wirkungsgrades und über Wärmegutschriften verbesserte Finanzierungsmöglichkeiten der Biogasanlagen. Ende 2006 ist die erste Biogasanlage in Betrieb gegangen, die Biomethan in das Erdgasnetz einspeist (Seebach et al. 2007).

In Deutschland gab es Ende 2009 etwa 4.950 Biogasanlagen mit einer installierten Leistung von 1.780 MW (DBFZ 2010). Allerdings ist mit dem Anstieg der Preise insbesondere für Mais, der zumeist als Substrat in Biogasanlagen verwendet wird, ein wirtschaftlicher Betrieb der Biogasanlagen schwieriger geworden, zumindest wenn man die Substrate zukaufen muss. In der Folge sind sowohl einige Biogasanlagenbetreiber und Produzenten in finanzielle Schwierigkeiten geraten und zum anderen dürfte sich das exponentielle Wachstum der Biogasbranche in den letzten Jahren in Zukunft abschwächen (Etscheid 2008).

Die veränderten Rahmenbedingungen spiegeln sich auch in Abschätzungen möglicher Biogaspotentiale und ihrer Nutzung wider. So prognostizierte das Wuppertal Institut et al. (2005), dass unter bestimmten Annahmen das technische Potential an produzierbarer Menge Biogas bis zum Jahr 2030 auf jährlich 16,58 Mrd. m³ anwächst. Bei einem realistischen Wachstumsszenario (regionale Begrenzung der Transportmöglichkeiten von Gülle, keine Beachtung von industriellen Rückständen) würde die erzeugte Menge Biogas bis zum Jahr 2030 auf rund 10 Mrd. m³ Biogas bzw. 5,3 Mrd. m³ Biomethan⁸² anwachsen: immerhin 6 % des derzeitigen Verbrauchs an Erdgas. In einer 2008 für das UBA fertig gestellten Studie „Nachhaltige Flächennutzung und nachwachsende Rohstoffe“ kommt das Wuppertal Institut et al. (2008) dagegen in den Szenarien BAU I und BAU II zu einem deutlich geringeren Anstieg der Biogasproduktion. Demnach ist im Szenario BAU I bis zum Jahr 2030 mit einer Biogasproduktion von 3,6 Mrd. m³ oder 1,91 Mrd. m³ Biomethan zu rechnen. Im BAU II-Szenario würde die Biogasmenge auf 4,04 Mrd. m³ ansteigen. Dies entspricht einer Menge an aufbereiteten Biomethan von 2,14 Mrd. m³. Im Vergleich dazu betrug die Biogasproduktion (Methangehalt) im Jahr 2005 etwa 880 Mio. m³ (Ramesohl et al. 2005).

Der Großteil der betriebenen Biogasanlagen sind kleine bis mittelgroße Anlagen. Die durchschnittliche Leistung der deutschen Biogasanlagen liegt bei 360 kW. Seit 2006 wird jedoch verstärkt in großindustrielle Anlagen investiert, die Leistungen von 20 MW und mehr aufweisen können (wie z.B. der BioEnergiepark „Klarsee“ in Penkun, der von der NAWARO Bioenergie AG betrieben wird).

Der Monitoringbericht des DBFZ (2010) liefert ebenfalls Informationen zu den beiden anderen Möglichkeiten der Verstromung von Biomasse. Zum einen die Nutzung fester Biomasse überwiegend als Biomasseheizkraftwerke, deren Anlagebestand aufgrund des Marktpreises der festen Biomasse sehr schwankend ist. Zum anderen die Pflanzenöl-Kraftwerke, die flüssige Biomasse verbrennen. Hier sind allerdings die Anlagen-

⁸² Unter Biomethan wird Biogas verstanden, das nach seiner Aufbereitung Erdgasqualität, d.h. einen Methangehalt von 96 - 97 %, besitzt. Es wird in diesen Abschätzungen von einem Methangehalt von 53 % im Biogas ausgegangen.

zahlen in Deutschland aktuell noch sehr gering. Beide Alternativtechnologien zur gasförmigen Nutzung der Biomassen werden in dieser Studie nicht mit abgeschätzt.

Biogas wird überwiegend in einem biologischen Prozess, der so genannten anaeroben Fermentation, erzeugt. Dabei zersetzen Mikroorganismen, die als Substrat eingebrachten Pflanzen und anderen organischen Materialien und bilden als Nebenprodukt Biogas, das zu zwei Dritteln aus Methan und zu einem Drittel aus Kohlendioxid besteht. Mit Blick auf den Materialbedarf einer Biogasanlage fallen besonders die Betonbauwerke zur Vorlagerung, der eigentliche Fermenter und die Bauten der Nachgärung und Gärrestlagerung ins Gewicht. Der Materialbedarf der BHKW, die zur Verstromung des Biogases notwendig sind, wird schon in einem vorherigen Kapitel abgeschätzt. Zur Funktionsweise und unterschiedlichen Bauweisen einer Biogasanlage gibt es umfangreiche Literatur z.B. der Fachagentur für Nachwachsende Rohstoffe.

Für die Abschätzung des Materialbestands der rund 4.950 Biogasanlagen wird zum einen auf Materialkoeffizienten von Jungbluth (2007) zurückgegriffen und zum anderen auf Edelmann et al. (2001). Beide Studien behandeln Schweizer Biogasanlagen, die allerdings deutlich kleiner ausgelegt sind als in Deutschland üblicherweise betriebene Biogasanlagen. In beiden Studien wird der Materialbedarf für eine Biogasanlage mit einem Fermenter-Volumen von lediglich 300 m³ abgeschätzt. Zudem ist in beiden Studien keine explizite Nachgäreinrichtung vorgesehen. Allerdings schätzt Edelmann et al. (2001) die Materialmenge einer Gärreststoffeinrichtung (Gülleresttank) mit ab. Bei Jungbluth (2007) wird dies aus dem Text nicht deutlich.

In der Diplomarbeit von Soukup (2008) zum Thema Produktökobilanz von Biogas zur Einspeisung in das Erdgasnetz, die am Wuppertal Institut betreut wurde, wird das Problem der kleinen Anlagengröße nicht durch ein lineares Hochrechnen der Werte auf eine deutsche Referenzgröße gelöst, sondern durch die Verwendung eines Skalierungsfaktors von $P^{2/3}$.

Dieser Skalierungsfaktor von $P^{2/3}$ (also ein schwächeres Wachstum des Materialbedarfs um 0,67 mit dem Anstieg der Leistung der Biogasanlage um 1 MW) wird für die Abschätzung in diesem Bericht übernommen und die Daten sowohl für Biogasanlagen mit Beton-Fermenter als auch Stahl-Fermenter auf Grundlage der Daten von Edelmann et al. (2001) auf die Größe von 1.500 m³ Fermentervolumen hochgerechnet. Die Größe der Nachgäranlagen bzw. Restlager im Vergleich zur Kapazität der Biogasanlage haben wir im Vergleich zu Edelmann et al. (2001) nach Literaturrecherchen etwas reduziert. Diese Recherchen haben ergeben, dass die Größe der Nachgäranlage bzw. Gärrestlagerung unabhängig von der Anlagengröße sehr unterschiedlich ausfallen können (Effenberger et al. 2009). Aufgrund dessen werden die Nachgäranlage bzw. Gärrestlager ebenfalls mit einem durchschnittlichen Volumenwert von 1500 m³ veranschlagt. Für die Aufteilung, wie viele Biogasanlagen mit Nachgäranlage und/oder mit Gärrestlager arbeiten, können die Angaben der Firma bioreact (www.biogaswissen.de) herangezogen werden. Demnach arbeiten 28 % der Anlagen, die in ihrer Datenbank erfasst sind, mit einer Nachgäranlage, 50 % mit einer Nachgäranlage plus Endlager, 12 % nur mit einem Endlager. Weitere 10 % der Anlagen sind

weder mit Endlager noch mit einer Nachgäranlage versehen. Wir kalkulieren für unsere Abschätzung für zwei Drittel der 4.950 Biogasanlagen eine Nachgäranlage bzw. ein Gärrestlager ein. Wir nehmen nach Edelmann et al. (2001) an, dass 90 % der Biogasanlagen mit einem Beton-Fermenter gebaut sind und nur 10 % der Biogasanlagen mit einem Stahl-Fermenter. Die unterstellten Größenordnungen wurden telefonisch mit Experten des DBFZ⁸³ diskutiert und abgestimmt. Im Gespräch wurde deutlich, dass selbst in der DBFZ-Datenbank des Bestandes an Biogasanlagen in Deutschland zurzeit keine umfassenden detaillierten Daten zur Ausstattung dieser Anlagen vorliegen. Seitens des DBFZ würden unsere Annahmen von 1,5 Fermentern pro Biogasanlage mit einem durchschnittlichen Volumen von 1500 m³ für plausibel angesehen. Zudem teilt das DBFZ unsere Einschätzung, dass bei der Erstellung einer Biogasanlage zumeist nicht auf bestehende bauliche Infrastrukturen zurückgegriffen werden kann.

Tab. 143: Materialbestand der Biogasanlagen (ohne BHKW)

	in Tonnen	Beton-Fermenter 1500 m ³	Stahl-Fermenter 1500 m ³	Nachgär- oder Gärrestanlage 1500 m ³	Summe
	Anzahl	6930	495	3300	in t
mineralische Rohstoffe	Beton	3.565.978	99.055	1.698.085	5.363.117
	Mörtel		1.769	63.678	65.447
metallische Rohstoffe	Stahl unlegiert, niedrig legiert	133.724	14.513	7.665	155.902
	Stahl legiert, rostfrei	16.096	2.123		18.219
	Kupfer	3.095	150		3.246
Kunststoff und sonstige	Polystyrol	7.058			7.058
	PE (HD)	2.105	1.176		3.281
	PVC	4.086			4.086
	Gummi		929		929
	Polyesterharz		1.176		1.176
Summe Mineralische Rohstoffe		3.565.978	100.824	1.761.763	5.428.564
Summe Metallische Rohstoffe		152.916	16.786	7.665	177.367
Summe Kunststoffe und sonstiges		13.249	3.281		16.530
Summe Insgesamt		3.732.142	120.891	1.769.428	5.622.462

Quelle: Eigene Berechnung auf Grundlage von Edelmann et al. (2001) und Soukup (2008);

Tab. 143 weist einen Materialbestand in den deutschen Biogasanlagen in Höhe von 5,6 Mio. Tonnen aus. Zusätzlich müssten eigentlich noch der Materialbedarf von rund 1,5 bis 1,8 BHKW pro Biogasanlage zugerechnet werden. Diese Materialmengen sind allerdings schon im Kapitel Materialbestand der BHKW enthalten. Die Ergebnisse zeigen, dass Biogasanlagen vor allem sehr betonintensiv sind, zum einen durch den hohen Anteil an Beton-Fermentern, aber auch durch die notwendige Bodenplatte aus Beton, die den Fermentern das notwendige Fundament liefert, um die hohen Lasten der Substrate und des Fermenters selbst zu tragen.

⁸³ Telefonischer Kontakt mit Elmar Fischer.

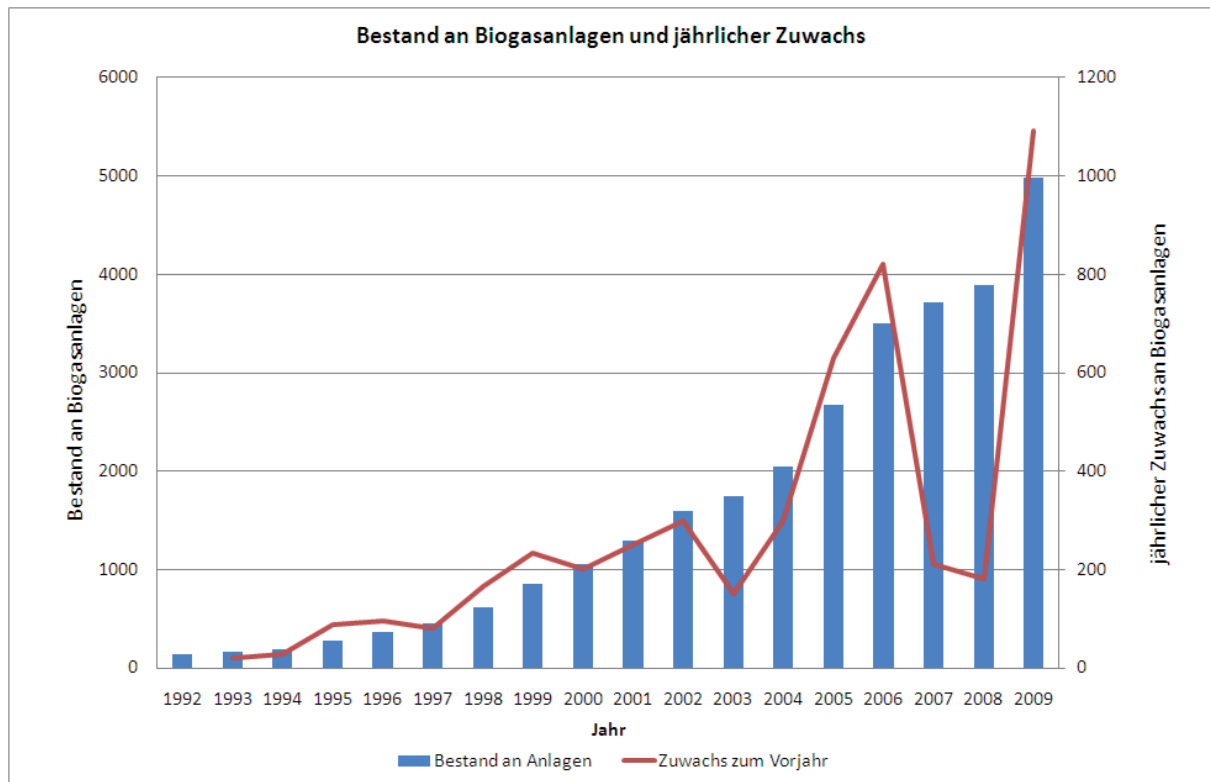
Die Ergebnisse mit ihrer Betonung des Betonbedarfs für Fermenter und Nachgäranlagen bzw. Gärrestelager reagieren empfindlich auf den angenommenen Volumenwert. Es gibt Beispiele bei denen deutlich größere Nachgäranlagen bei Fermentergrößen $<1.500\text{ m}^3$ existieren. Es wäre also durchaus realistisch, die Nachgäranlage bzw. das Gärrestelager mit einem Volumen von 3.000 oder 4.000 m^3 abzuschätzen. Entsprechend wäre der Materialbestand der Biogasanlagen deutlich höher als hier abgeschätzt.⁸⁴ Ebenso sind die unterstellten Materialbedarfe pro Anlage je nach Literatur sehr unterschiedlich. Hätten wir den Materialbedarf der Biogasanlagen mit einer typischen Größenkategorie mittels der Daten der GEMIS-Datenbank 4.5 ermittelt (Biogasanlage mit einem Fermentervolumen von 1500 m^3 und einer Leistung von 630 $\text{kW}_{\text{el.}}$) würde sich der Materialbestand der Biogasanlagen im Gegensatz zur Nutzung der Koeffizienten aus Edelmann et al. (2001) und Soukup (2008) auf knapp 10 Mio. Tonnen nahezu verdoppeln. Um Überschätzungen zu vermeiden, haben wir in unserer Hochrechnung konservative Größenkategorien gewählt.

Jährlicher Materialbedarf für Ausbau, Erneuerung und Instandhaltung von Biogasanlagen

Wie bei WEA sind die Zuwachsraten der Biogasanlagen bekannt (Abb. 11). Nach einem Einbruch der Zuwachsraten in 2007 und 2008 ist der Neubau von Biogasanlagen im Jahr 2009 wieder stark angestiegen. Es liegen keine anlagenspezifischen Informationen zur Leistung dieser neubauten Biogasanlagen vor. Aus dem Monitoringbericht der DBFZ (2010) wird allerdings deutlich, dass der größte Zubau in den letzten Jahren bei mittleren Anlagen mit einer Leistung von 70 bis 500 $\text{kW}_{\text{el.}}$ erfolgte. In 2009 stieg aufgrund veränderter Vergütungsstrukturen der Stromeinspeisung die Zahl der kleinen Biogasanlagen bis 150 $\text{kW}_{\text{el.}}$ stark an. Über die kumulierte Gesamtleistung aller Biogasanlagen wird aber auch deutlich, dass die durchschnittliche Leistung pro Biogasanlage von 58 $\text{kW}_{\text{el.}}$ im Jahr 1999 auf 365 $\text{kW}_{\text{el.}}$ in 2009 gestiegen ist.

⁸⁴ Bei einem Volumen von 3.000 m^3 für die 3.300 Nachgäranlagen bzw. Gärrestanlagen würde sich z.B. der Materialbestand von 5,6 auf 6,7 Mio. Tonnen erhöhen.

Abb. 11: Zuwachs und Bestand an Biogasanlagen



Quelle: Eigene Darstellung, basierend auf Olzem (2010)

Für die Abschätzung wird angenommen, dass pro Jahr 400 Biogasanlagen neu gebaut werden. Dies entspricht in etwa dem durchschnittlichen Wert der letzten Jahre, wobei die Entwicklung des Zubaus sehr schwankend ist. Des Weiteren wird angenommen, dass alle Anlagen mit Beton-Fermenter sowie zwei Drittel der Anlagen mit einer Nachgäranlage bzw. Gärrestelager versehen sind. Die Anzahl und das Volumen der Fermenter und der Nachgäranlage bzw. des Gärrestelagers werden analog zum Bestand mit 1,5 Fermentern pro Biogasanlage bzw. einem Volumen von 1.500 m³ abgeschätzt. Aus diesen Annahmen ergibt sich ein jährlicher Materialbedarf für den Zubau an Biogasanlagen (ohne BHKW) von insgesamt 540.000 t. Aus der Aufteilung (Tab. 143) wird deutlich, dass der Materialbedarf ganz eindeutig durch Beton für die Fermenter und Nachgäranlagen und Endlager bestimmt wird.

Tab. 144: Jährlicher Materialbedarf für den Zubau von Biogasanlagen (ohne BHKW)

	in Tonnen	Beton- Fermenter 1500 m ³	Nachgär- oder Gärrestanlage 1500 m ³	Summe
	Anzahl	600	400	in t
mineralische Rohstoffe	Beton	308.743	205.828	514.571
	Mörtel		7.719	7.719
metallische Rohstoffe	Stahl unlegiert, niedrig legiert	11.578	929	12.507
	Stahl legiert, rostfrei	1.394		1.394
	Kupfer	268		268
Kunststoff und sonstige	Polystyrol	611		611
	PE (HD)	182		182
	PVC	354		354
Summe Mineralische Rohstoffe		308.743	213.547	522.290
Summe Metallische Rohstoffe		13.239	929	14.169
Summe Kunststoffe und sonstiges		1.147		1.147
Summe Insgesamt		323.129	214.476	537.605

Quelle: Eigene Berechnungen, abgeleitet aus den Daten von 2007-2009

Biogasanlagen haben eine Lebensdauer von rund 20 Jahren. Die mengenmäßig dominanten Betonbauwerke werden diese Zeitspanne vermutlich ohne größere Instandhaltungsmaßnahmen überstehen. Mechanische Bauteile wie Rührwerke oder auch Folienabdeckungen werden mindestens einmal innerhalb der 20 Jahren Nutzungsdauer ausgetauscht. Bei BHKW von Biogasanlagen wird in der Literatur eine Lebensdauer von fünf bis sieben Jahren angegeben. Der Ersatzaufwand einer Biogasanlage ist damit zumindest aus stofflicher Sicht eher gering. Es wird daher wie bei konventionellen Kraftwerken nur 10 % des Bestands an Beton und unlegiertem Stahl in die Abschätzung des Instandhaltungsbedarfs einbezogen. Bei einer jährlichen Abschreibung über die Lebensdauer (20 Jahre für 10 % des Beton und unlegierten Stahl, 10 Jahre für 100 % der restlichen Materialien), käme man auf durchschnittliche jährliche Materialbedarfe für die Instandhaltung der 4.950 Biogasanlagen von 31.722 Tonnen. Mit 21.743 t würde Beton den jährlichen Materialbedarf für Instandhaltung eindeutig dominieren.

Tab. 145: Jährlicher Materialbedarf für Instandhaltung von Biogasablagen (ohne BHKW)

	in Tonnen	Beton- Fermenter	Stahl- Fermenter	Nachgär- oder Gärrestanlage	Summe
		1500 m ³	1500 m ³	1500 m ³	
	Anzahl	6930	495	3300	in t
mineralische Rohstoffe	Beton	17.830	495	8.490	26.816
	Mörtel	0	9	318	327
metallische Rohstoffe	Stahl unlegiert, niedrig legiert	669	73	38	780
	Stahl legiert, rostfrei	1.610	212	0	1.822
	Kupfer	310	15	0	325
Kunststoff und sonstige	Polystyrol	706	0	0	706
	PE (HD)	210	118	0	328
	PVC	409	0	0	409
	Gummi	0	93	0	93
	Polyesterharz	0	118	0	118
Summe Mineralische Rohstoffe		17.830	504	8.809	27.143
Summe Metallische Rohstoffe		2.588	300	38	2.926
Summe Kunststoffe und sonstiges		1.325	328	0	1.653
Summe Insgesamt		21.743	1.132	8.847	31.722

Quelle: Eigene Berechnungen, abgeleitet über die technische Lebensdauer, in Tonnen

5.3 Kumulierter Materialaufwand der Energieinfrastruktur

Die Energieinfrastrukturen sind im besonderen Maße durch metallische Rohstoffe geprägt. Daher ist gerade bei Energieinfrastrukturen der kumulierte Materialaufwand im Vergleich zu den Materialaufwendungen ohne Beachtung der ökologischen Rücksäcke deutlich höher als z.B. bei Verkehrsinfrastrukturen. Zudem sind die Materialien, die in der Abschätzung des Materialbestandes und der jährlichen Flüsse der Energieinfrastrukturen erfasst sind, zum Teil mit einem hohen MIT-Koeffizient verbunden. In der Zusammenfassung der Ergebnisse wird an dieser Stelle nicht mehr jede Energieerzeugungstechnologie und jedes Energienetz separat in seiner Ausführlichkeit dargestellt, sondern subsumiert unter kumulierter Materialaufwand der Energieerzeugung und –verteilung.

Tab. 146: Kumulierter Materialaufwand der Energieerzeugungsinfrastruktur

in 1.000 Tonnen		MIT Koeffizient in t/t	Materialbestand Energieerzeugung	kum. MA Bestand	jährl. MA Neubau	kum. MA Neubau	jährl. MA Instandhaltung	kum. MA Instandhaltung
metallische Rohstoffe	Stahl un- bzw. niedriglegierter	1,47	10.448	15.359	491	721	55	81
	Stahl legiert oder rostfrei	17,94	1.872	33.584	114	2.047	47	835
	Gusseisen	7,63	522	3.980	45	346	9	72
	Kupfer	179,07	229	40.973	15	2.719	3	536
	Aluminium	18,98	209	3.965	12	233	2	47
	Messing	120,87	17	2.038	1	95	1	93
	Zinn	8.486	0	793	0	111	0	73
	Titan	95,00	1	82	0	0	0	2
	Palladium**	320.300	0	166	0	25	0	17
	Platin	320.300	0	706	0	107	0	71
	Blei	15,60	6	97	0	4	0	2
	Nickel	141,29	0	3	0	0	0	0
	Zink	21,76	7	141	0	7	0	4
	sonstige NE-Metalle*	1,00	17	17	2	2	0	0
mineralische Rohstoffe	Beton	1,33	67.967	90.396	2.837	3.773	162	215
	Mauerwerk	2,11	527	1.112	15	31	1	3
	Sand/Kies/Schotter	1,18	4.964	7.049	163	231	12	18
	Leichtbeton	1,33	87	197	9	20	0	0
	Zement	3,22	65	211	8	25	0	1
	Asbestzement**	3,22	125	401	0	0	3	10
	Asphalt/Bitumen**	1,50	47	71	1	2	0	0
	Keramik/Fliesen	2,88	12	35	1	2	0	1
Kunststoffe/sonstigen Rohstoffe	Mineralwolle	4,00	222	890	12	49	6	23
	GFK	6,22	385	4.178	30	330	0	4
	Gummi	5,70	8	8	0	0	0	0
	PE (HD)	2,52	73	183	3	8	2	6
	PP	2,09	7	14	0	0	0	0
	PVC	3,47	69	239	4	14	2	7
	Epoxidharz	13,73	33	451	1	16	0	2
	Sonstiges*	1,00	5.692	5.692	11	11	71	71
Summe Mineralische Rohstoffe			73.794	99.473	3.033	4.085	179	247
Summe Metallische Rohstoffe			13.328	101.905	681	6.417	118	1.833
Summe Kunststoffe und Sonstige Rohstoffe			6.489	11.656	62	428	82	113
Summe Insgesamt			93.611	213.033	3.776	10.930	379	2.194

Quelle: Eigene Abschätzung auf Basis von Wuppertal Institut (2003), *keine MIT-Koeffizienten vorhanden, ** für Palladium wird der MIT-Koeffizient von Platin verwendet, Asbestzement wird mit dem Koeffizienten von Zement berechnet, und für Asphalt/Bitumen wird vereinfachend der Koeffizient für schweres Heizöl genutzt.

Tab. 147: Kumulierter Materialaufwand der Energieverteilungsinfrastruktur

in 1.000 Tonnen		MIT Koeffi- zient in t/t	Material- bestand Energie- netze	kum. MA Bestand	jährl. MA Neubau	kum. MA Neubau	jährl. MA Instand- haltung	kum. MA Instand- haltung
minerali- sche Rohstoffe	Beton	1,33	25.628	34.085	172	228	42	55
	Sand	1,18	584.988	830.683	15.606	22.160	1.816	2.579
	Zement	3,22	1.427	4.594	0	0	0	0
	Bitumen**	1,50	112	167	11	17	1	1
metallische Rohstoffe	Stahl	8,05	25.026	235.745	377	3.549	35	326
	Grauguss	7,63	220	324	0	0	0	0
	Duktiler Guss	7,63	645	948	0	0	0	0
	Kupfer	179,07	3.408	610.280	29	5.151	25	4.481
	Aluminium	18,98	1.817	34.488	30	571	18	346
	Blei	15,60	1.124	17.533	0	0	0	0
Kunststoffe/ sonstige Rohstoffe	PVC	3,47	1.435	4.978	0	0	0	0
	PE	2,52	2.235	5.633	58	145	23	58
	PUR-Hartschaum	6,32	264	1.672	0	0	0	0
	Mineralwolle	4,00	61	245	0	0	0	0
	Holz	4,80	725	725	0	0	0	0
	Paraffinbasisches Öl, Silikonöl*	1,00	655	655	0	0	0	0
	Isolieröl/Haft- masse*	1,00	259	259	0	0	0	0
Summe Mineralische Rohstoffe			612.154	869.529	15.788	22.405	1.859	2.636
Summe Metallische Rohstoffe			32.240	899.318	436	9.272	78	5.153
Summe Kunststoffe und Sonstige Rohstoffe			5.634	14.167	58	145	23	58
Summe Insgesamt			650.029	1.783.014	16.282	31.822	1.960	7.847

Quelle: Eigene Abschätzung auf Basis von Wuppertal Institut (2003), *keine MIT-Koeffizienten vorhanden, ** für Bitumen wird vereinfachend der Koeffizient für schweres Heizöl genutzt.

Im kumulierten Materialaufwand des Bestandes sind die metallischen Rohstoffe aufgrund ihrer hohen ökologischen Rucksäcke jeweils in ähnlicher Größenordnung gebunden wie die mineralischen Rohstoffe (jeweils knapp 900 Mio. Tonnen in den Energienetzen und 100 Mio. Tonnen im Bestand der Energieerzeugungsinfrastruktur).

Die Interpretation der jährlichen Materialflüsse für Neubau und Instandsetzung mit ökologischen Rucksäcken vs. ohne ökologische Rucksäcke unterscheidet sich nicht grundlegend von den Ergebnissen der Bestandsgrößen. Mit Ausnahme des Neubaus von Energienetzen bilden metallische Rohstoffe in der Summe der kumulierten Materialaufwendungen für die jährlichen Flüsse jeweils die wichtigste Materialkategorie. Mineralische Rohstoffe, die in den jährlichen Flüssen ohne Beachtung der ökologischen Rucksäcke ähnlich wie im Bestand die Summe der Materialflüsse dominieren, verlieren unter Beachtung der vorgelagerten abiotischen Materialaufwendungen an Bedeutung.

5.4 Zusammenfassung Energieinfrastruktur

Tab. 146 und Tab. 147 fassen die Ergebnisse der Abschätzung des Materialbestandes der Energieinfrastruktur in Deutschland übersichtsartig zusammen. Aufgrund des enormen Sandbedarfs für die Bettung der Stromkabel und Gasleitungen ist die Energieverteilung mit einem Bestand von 650 Mio. Tonnen deutlich materialintensiver als die Energieerzeugungsanlagen (94 Mio. Tonnen). Ohne diesen Sandbedarf (585 Mio. Tonnen) wäre die Energieerzeugung materialintensiver als die Energieverteilung (65 Mio. Tonnen ohne Sand). In beiden Teilsystemen der Energieinfrastruktur sind neben Sand vor allem Beton und Stahl die bestimmenden Materialkategorien. In der Energieverteilung ist wenig überraschend der Bestand an Kupfer (3,4 Mio. Tonnen), Aluminium (1,8 Mio. Tonnen) und Blei (1,1 Mio. Tonnen), auch im Vergleich zu anderen untersuchten Infrastruktursystemen, sehr hoch. Im Bereich Energieverteilung kann der Betonverbrauch fast vollständig über die Fundamente für Hochspannungsmasten erklärt werden. Aber auch im Bereich Energieerzeugung trägt die Notwendigkeit der Erstellung von Fundamenten für regenerative Energieanlagen (Biogas und Windenergieanlagen) einen großen Anteil am Betonbedarf bei. Allgemein fällt auf, dass der Bestand an Anlagen für regenerative Energieerzeugung im Vergleich zu konventionellen Energieversorgungseinrichtungen in der Erstellungsphase mit einem hohen Materialeinsatz verbunden ist. Windenergieanlagen oder Wasserkraftanlagen sind mit ihren gespeicherten Mengen an Materialien von 14,5 Mio. Tonnen bzw. 15,5 Mio. Tonnen auf ähnlichem Niveau wie die Braun- und Steinkohlekraftwerke oder liegen sogar über den Kernkraftwerken. Bei der Interpretation dieser Daten ist jedoch zu beachten, dass die Materialintensität der Nutzenergie (pro kWh) bei fossil befeuerten Kraftwerken und Kernkraftwerken (KKW) deutlich über den Werten von Windenergieanlagen (WEA) und Wasserkraft liegen.

Über den Bedarf an Zink als Korrosionsschutz für Masten liegen keine Daten vor. Der hohe Anteil an Kunststoffmantelrohren im Bereich Wärmenetze ergibt einen hohen Anteil an PE-Kunststoff im Bereich Energieverteilung.

Tab. 148: Übersicht über den Materialbestand der Energieerzeugung (in Tonnen)

	in Tonnen	Steinkohle	Braunkohle	Erdgas	Wasserkraft	Windkraft	Kernenergie	BHKW	Biogas	Summe
metallische Rohstoffe	Stahl un- bzw. niedriglegierter	1.062.625	3.532.458	540.627	361.122	3.167.139	1.400.841	227.690	155.902	10.448.404
	Stahl legiert oder rostfrei	1.071.118	212.878	97.019	675	409.822	54.496	7.788	18.219	1.872.015
	Gusseisen	28.379	36.665	33.071		363.958	6.941	52.635		521.650
	Kupfer	20.096	26.842	14.487	16	123.459	31.680	8.986	3.246	228.812
	Aluminium	68.325	91.390	3.439	8	39.242	3.592	2.886		208.881
	Messing	7.036	9.385	439						16.860
	Zinn					7		86		94
	Titan						862			862
	Palladium							0,52		1
	Platin							2		2
	Blei	2.010	2.684	366		7	1.104	41		6.212
	Nickel							18		18
	Zink	3.013	3.256	219				13		6.502
	sonstige NE-Metalle					17.415		0,27		17.416
mineralische Rohstoffe	Beton	14.525.013	12.017.473	2.477.781	12.772.331	9.816.237	10.805.419	189.750	5.363.117	67.967.120
	Mauerwerk		440.531	17.560			68.946			527.037
	Sand/Kies/Schotter		4.952.556	11.560						4.964.116
	Leichtbeton					86.596				86.596
	Zement								65.447	65.447
	Asbestzement						124.685			124.685
	Asphalt/Bitumen	9.610	18.032	8.195			11.316			47.152
	Keramik/Fliesen	11.340	821							12.161
Kunststoffe/sonstigen Rohstoffe	Mineralwolle	112.956	46.516	9.146			35.020	18.843		222.480
	GFK	15.803				369.645				385.447
	Gummi	3.418		439		3.153		330	929	8.269
	PE (HD)	4.520	60.197				421	4.155	3.281	72.574
	PP	2.264		3.000			1.336			6.599
	PVC	52.623		5.487			6.310	396	4.086	68.902
	Epoxidharz	5.988				26.876				32.864
	Sonstiges	26.673	151.012	1.975	5.453.100	44.642	6.268	396	8.234	5.692.300
Summe Mineralische Rohstoffe		14.545.963	17.429.412	2.515.096	12.772.331	9.902.833	11.010.365	189.750	5.428.564	73.794.315
Summe Metallische Rohstoffe		2.262.602	3.915.559	689.667	361.820	4.121.050	1.499.516	300.146	177.367	13.327.728
Summe Kunststoffe und sonstige Rohstoffe		224.245	257.724	20.048	5.453.100	444.316	49.354	24.120	16.530	6.489.436
Summe Insgesamt		17.032.810	21.602.696	3.224.810	18.587.251	14.468.199	12.559.234	514.016	5.622.462	93.611.479

Quelle: Eigene Abschätzung, Details zu Annahmen und zugrunde gelegten Quellen siehe vorherige Kapitel

Tab. 149: Übersicht über den Materialbestand der Energieverteilung (in Tonnen)

in Tonnen		Erdgas (Fernlei- tungnetz)	Erdgas (Regional- und Orts- netz)	Fernwärme	Nahwärme	Stromnetz (Kabel)	Strom- netz (Freilei- tung)	Masten (Freileitung)	Trans- format- oren	Summe
minerali- Rohstoffe	Beton		2.181.144	10.031.961				13.414.896		25.628.001
	Sand	120.243.333	202.575.400	10.078.826		252.090.449				584.988.007
	Zement		1.417.744	8.826						1.426.570
	Bitumen	107.994	0	3.626						111.619
metallische Rohstoffe	Stahl	12.512.879	4.147.494	833.021	709.175	551.683	254.844	4.499.189	1.517.710	25.025.997
	Grauguss		220.275							220.275
	Duktiler Guss		545.793	48.392	50.925					645.110
	Kupfer					2.441.633	570.298		396.120	3.408.050
	Aluminium					1.063.980	753.111			1.817.091
	Blei					1.123.912				1.123.912
Kunststoffe/ sonstige Rohstoffe	PVC					1.434.715				1.434.715
	PE	212.520	1.049.395	51.159	157.500	724.279	40.573			2.235.426
	PUR-			61.734	202.750					264.484
	Mineralwolle			61.356						61.356
	Holz							724.645		724.645
	Paraffinbasi- sches Öl, Silikonöl								654.700	654.700
	Isolieröl/ Haftmasse					259.148				259.148
	Sonstige									0
Summe Mineralische Rohstoffe		120.351.327	206.174.288	20.123.239	0	252.090.449	0	13.414.896	0	612.154.198
Summe Metallische Rohstoffe		12.512.879	4.913.562	881.414	760.100	5.181.208	1.578.253	4.499.189	1.913.830	32.240.435
Summe Kunststoffe und sonsti- ge Rohstoffe		212.520	1.049.395	174.250	360.250	2.418.142	40.573	724.645	654.700	5.634.475
Summe Insgesamt		133.076.726	212.137.244	21.178.902	1.120.350	259.689.799	1.618.826	18.638.730	2.568.530	650.029.107

Quelle: Eigene Abschätzung, Details zu Annahmen und zugrunde gelegten Quellen siehe vorherige Kapitel

Die jährlichen Materialbedarfe für den Neubau und die Erweiterung der verschiedenen Energieinfrastrukturen sind in den Tab. 148 und Tab. 149 übersichtsmäßig zusammengefasst.

Tab. 150: Jährlicher Materialbedarf für den Neubau von Einrichtungen der Energieerzeugung

in Tonnen		Steinkohle	Braunkohle	Erdgas	Windkraft	BHKW	Biogas	Summe
metallische Rohstoffe	Stahl un- bzw. niedriglegierter	70.331	115.988	9.500	247.738	34.499	12.507	490.562
	Stahl legiert oder rostfrei	72.078	6.990	1.705	30.764	1.180	1.394	114.111
	Gusseisen	1.905	1.204	581	33.700	7.975		45.365
	Kupfer	1.349	881	255	11.068	1.362	268	15.183
	Aluminium	4.595	3.001	60	4.185	437		12.279
	Messing	471	308	8				787
	Zinn				0	13		13
	Palladium					0,08		0,08
	Platin					0,33		0,33
	Rhodium					0,04		0,04
	Blei	135	88	6	0	6		236
	Nickel					3		3
	Zink	202	107	4		2		315
	sonstige NE-Metalle				1.789			1.789
mineralische Rohstoffe	Beton	926.096	394.594	43.541	929.385	28.750	514.571	2.836.936
	Mauerwerk		14.465	309				14.773
	Sand/Kies/Schotte		162.617	203				162.820
	Leichtbeton				8.940			8.940
	Zement						7.719	7.719
	Asphalt/Bitumen	648	592	144				1.384
	Keramik/Fliesen	760	27					787
Kunststoff-sonstigen Rohstoffe	Mineralwolle	7.596	1.527	161		2.855		12.139
	GFK	1.063	0		29.420			30.483
	Gummi	230	0	8	207	50	0	495
	PE (HD)	303	1.977			630	182	3.092
	PP	152	0	53				205
	PVC	3.538	0	96		60	354	4.049
	Epoxidharz	403	0		732			1.135
	Sonstiges	1.792	4.958	35	3.291	60	611	10.747
Summe Mineralische Rohstoffe		927.503	572.295	44.196	938.325	28.750	522.290	3.033.359
Summe Metallische Rohstoffe		151.067	128.567	12.119	329.244	45.477	14.169	680.643
Summe Kunststoffe und sonstige Rohstoffe		15.078	8.462	352	33.651	3.653	1.147	62.345
Summe Insgesamt		1.093.648	709.325	56.668	1.301.220	77.881	537.605	3.776.347

Quelle: Eigene Abschätzung, Details zu Annahmen und zugrunde gelegten Quellen siehe vorherige Kapitel

Für Wasserkraftwerke und Kernkraftwerke wird kein Materialbedarf für Neubau abgeschätzt. Beide Spalten fehlen daher in Tab. 148. Die hohe Dynamik bei der Nutzung erneuerbarer Energiequellen spiegelt sich in den geschätzten Materialflüssen für Neubau wider. Der jährliche Materialbedarf für die Erstellung von WEA und Biogasanlagen, kombiniert mit der Erstellung von BHKW, übertrifft knapp den Materialbedarf der für die Erstellung neuer konventioneller Kraftwerke mit fossilen Energieträgern nötig ist. Zu großen Teilen ist der jährliche Materialbedarf, wie auch der Bestand, durch die benötigte Menge an Beton geprägt.

Tab. 151: Jährlicher Materialbedarf für den Neubau und Erweiterung der Energieverteilungsinfrastruktur

in Tonnen		Erdgas (Fernlei- tungsnetz)	Erdgas (Re- gional- und Ortsnetz)	Stromnetz (Kabel)	Stromnetz (Freileitung)	Masten (Freileitung)	Summe
Mineralische Rohstoffe	Beton		45.252			126.294	171.546
	Sand	3.172.366	6.410.700	6.022.490			15.605.556
	Bitumen	11.397					11.397
Metallische Rohstoffe	Stahl	330.126			5.035	41.621	376.782
	Kupfer			25.854	2.912		28.765
	Aluminium			16.731	13.373		30.104
Kunststoffe	PE	7.476	29.908	19.953	194		57.531
Summe Mineralische Rohstoffe		3.183.763	6.455.952	6.022.490	0	126.294	15.788.499
Summe Metallische Rohstoffe		330.126	0	42.585	21.320	41.621	435.651
Summe Kunststoffe und sonstige Rohstoffe		7.476	29.908	19.953	194	0	57.531
Summe Insgesamt		3.521.365	6.485.860	6.085.028	21.514	167.915	16.281.681

Quelle: Eigene Abschätzung, Details zu Annahmen und zugrunde gelegten Quellen siehe vorherige Kapitel

Der Materialbedarf für die Erweiterung der Energienetze ist mit knapp 16,3 Mio. Tonnen aufgrund der Sandbettung für Gas- und Stromleitungen deutlich höher als die des Neubaus von Energieerzeugungsanlagen. Ohne den Sandbedarf beträgt der jährliche Materialbedarf jedoch nur 676.000 Tonnen. Dieser Wert ergibt sich auch aus der Verwendung leichterer Materialien für die heutigen Zubauten im Versorgungsnetz der Gasinfrastruktur (PE-Rohre). Zudem wird angenommen, dass betonintensive Freileitungsneubauten fast nur noch im HS-Netz erfolgen. Für Wärmenetze waren entweder keine Informationen über den jährlichen Zuwachs verfügbar (Nahwärme), oder diese waren so gering (Fernwärme), dass auf eine Abschätzung der jährlichen Materialströme für Neubau und Erweiterung der Wärmenetze verzichtet wurde.

Da zumeist keine konkreten Daten für den jährlichen Aufwand für Instandhaltung bekannt sind, erfolgte die Abschätzung des jährlichen Materialbedarfs für Instandhaltung von Infrastrukturbestandteilen der Energieerzeugung über die jährliche materielle Abschreibung über die technische Lebensdauer. In der Praxis wird die Instandhaltung vermutlich weniger intensiv sein als über die Lebensdauer geschätzt, da gerade die Gebäudetechnik über ihre Lebensdauer hinweg nur in geringem Umfang ausgetauscht wird. Vielmehr wird vermutlich am Ende der Betriebsdauer (oder Jahre darüber hinaus) direkt ein Neubau anstelle der alten Anlage stattfinden. Deshalb werden die Materialanteile, die der Gebäudetechnik zugeschrieben werden können, bzw. pauschal die Mengen an Beton und Bewehrungsstahl jeweils nur mit 10 % ihrer Menge in die Abschreibung über die Lebensdauer mit einbezogen.

Im Bereich der WEA entwickelt sich die Technik und damit die Leistungsstärke noch so rasant, dass ältere kleinere Anlage schon vor dem Ende der technischen Lebensdauer durch neuere, leistungsstärkere Anlagen ausgetauscht werden. Dies geschieht dann häufig mit einem Komplettaustausch samt Mast und Fundament (Repowering).

Die Instandhaltung der Energienetze wird nicht über die technische Lebensdauer sondern vielmehr über monetäre Investitionszahlen abgeschätzt. Über die Instandhaltung von Wärmenetzen sind wie über deren Neubau keine Informationen verfügbar. Nach unseren Berechnungen ist die Instandhaltung der Energienetze mit jährlich knapp 2 Mio. Tonnen deutlich materialintensiver als die der Energieerzeugung mit jährlich zusammen 380.000 Tonnen.

Tab. 152: Jährlicher Materialbedarf für die Instandhaltung der Energieerzeugungsinfrastruktur

in Tonnen		Stein- kohle	Braun- kohle	Erdgas	Wasser- kraft	Kern- energie	BHKW	Biogas	Summe
metallische Rohstoffe	Stahl un- bzw. niedriglegierter	18.251	8.831	0	451	3.835	22.769	780	54.916
	Stahl legiert oder rostfrei	26.778	5.322	10.460	8	1.362	779	1.822	46.531
	Gusseisen	709	917	2.425		174	5.264		9.489
	Kupfer	502	415	86	0,2	766	899	325	2.993
	Aluminium	456	880	827	0,4	41	289		2.493
	Messing	176	235	362					773
	Zinn						9		9
	Titan					22			22
	Palladium						0,1		0,1
	Platin						0,2		0,2
	Rhodium						0,03		0,03
	Blei	50	67	5		28	4		154
	Nickel						2		2
	Zink	75	81	11			1		169
minerali- Rohstoffe	Beton	36.313	30.044	6.194	15.965	27.338	18.975	26.816	161.644
	Mauerwerk		1.101	44		172			1.318
	Sand/Kies/Schotter		12.381	29					12.410
	Zement							327	327
	Asbestzement					3.117			3.117
	Asphalt/Bitumen	24	45	20		28			118
	Keramik/Fliesen	284	4						287
Kunststoffe/ sonstigen Rohstoffe	Mineralwolle	2.711	847	6		182	1.884		5.630
	GFK	395	0						395
	Gummi	85	0	137			33	93	348
	PE (HD)	113	1.505			11	415	328	2.372
	PP	38	0	46		33			117
	PVC	1.263	0	229		158	40	409	2.098
	Epoxidharz	150	0						150
	Sonstiges	648	929	0	68.164	136	40	823	70.740
Summe Mineralische Rohstoffe		36.620	43.575	6.288	15.965	30.655	18.975	27.143	179.222
Summe Metallische Rohstoffe		46.998	16.747	14.177	460	6.227	30.015	2.926	117.550
Summe Kunststoffe und sonstige		5.403	3.281	417	68.164	520	2.412	1.653	81.850
Summe Insgesamt		89.021	63.603	20.882	84.590	37.403	51.402	31.722	378.622

Quelle: Eigene Abschätzung, Details zu Annahmen und zugrunde gelegten Quellen siehe vorherige Kapitel

Tab. 153: Jährlicher Materialbedarf für Instandhaltung Energienetze

in Tonnen		Erdgas (Fernlei- tungsnetz)	Erdgas (Regional- und Orts- netz)	Stromnetz (Kabel)	Stromnetz (Freileitung)	Masten (Freileitung)	Summe
Mineralische Rohstoffe	Beton		27.370			14.288	41.658
	Sand			1.816.143			1.816.143
	Bitumen	981					981
Metallische Rohstoffe	Stahl	28.406			1.051	5.103	34.560
	Kupfer			25.023			25.023
	Aluminium			15.425	2.819		18.244
Kunststoffe	PE	643	18.089	4.290			23.023
Summe Mineralische Rohstoffe		981	27.370	1.816.143	0	14.288	1.858.782
Summe Metallische Rohstoffe		28.406	0	40.448	3.870	5.103	77.827
Summe Kunststoffe und sonstige		643	18.089	4.290	0	0	23.023
Summe Insgesamt		30.030	45.460	1.860.881	3.870	19.391	1.959.632

Quelle: Eigene Abschätzung, Details zu Annahmen und zugrunde gelegten Quellen siehe vorherige Kapitel

6 Überblick über die jährlichen Materialflüsse unter Einbeziehung der Abbruchmengen und ihrer Behandlung / Verwertung

Aus den bisherigen Ergebnissen ist zwar ersichtlich, welche Mengen jährlich für den Neu- und Ausbau bzw. die Instandhaltung der meisten Bereichen der Verkehrs-, Wasser- und Abwasser- sowie der Energieinfrastruktur benötigt werden, aber nicht, welche Abbruchmengen entstehen und was mit diesen geschieht. Obwohl die Daten zur Menge der Abbruchmaterialien in der Regel nicht vorhanden sind, kann eine Materialflussbilanzierung helfen, die bekannten Stoffströme zu systematisieren und Informationslücken über verschiedene Output-Flüsse aufzuzeigen, ggfs. auch zu schließen. Weiterhin können vorhandene Daten zur Verwertung bei der Unterscheidung zwischen Primär- und Sekundärmaterial helfen.

Bei den Abfallströmen sind verschiedene Verbleib- bzw. Verwertungsmöglichkeiten denkbar:

- Internes Recycling: Materialien, die bei der Instandhaltung anfallen, werden rezykliert und direkt im eigenen Infrastruktursystem wiederverwendet. Ein Beispiel sind Asphalt-Deckschichten oder Sandbettungen.
- Externes Recycling: Materialien, die rezykliert werden, allerdings nicht zwingend in ihrem Herkunftsbereich als Sekundärmaterial verwendet werden. Dies ist häufig bei metallischen Rohstoffen der Fall.
- In situ Deponie bezeichnet den Verbleib nicht mehr verwendeter Materialkomponenten am Ort der letzten Verwendung, z.B. weil sie auf Grund hoher Kosten nicht geborgen werden und damit für eine Weiternutzung entfallen. Dies kann z.B. bei alten Abwasser- oder Wasserleitungen geschehen, wo Leitungen in geschlossener Bauweise ersetzt werden und die alten Rohre beim Einzug der neuen Rohre quasi gesprengt werden und häufig im Erdreich verbleiben.
- Deponie: Umfasst alle Materialien, die nicht wiederverwertet und nach ihrer Nutzungsphase in geeigneten Deponien entsorgt werden.
- Thermische Entsorgung/Verwertung: Abbruchmaterialien mit organischen Bestandteilen, vor allem Holz, Kunststoffe und Ähnliches werden thermisch entsorgt. Das betrifft z.B. Altholz; teerölimprägnierte Bahnschwellen, die nicht im Landschaftsbau eingesetzt werden, müssen als Sonderabfall in zugelassenen Anlagen thermisch entsorgt werden.

Die notwendigen Mengen zur Instandhaltung werden zumeist über die technische Lebensdauer ermittelt. Dieser in der Ökobilanzierung übliche Ansatz definiert dabei die jährliche technische Abschreibung als Ersatz des Altmaterials durch Neumaterial. Durch Materialsubstitution (PE-Rohre statt Graugussrohre etc.) muss den jährlichen Materialströmen für die Instandhaltung jedoch keine Abbruchmenge in gleicher Höhe gegenüberstehen. Aufgrund der hohen Unsicherheit über die Verwendung der Ab-

bruchmassen haben wir die Verwertungskategorien ohne Flussgrößen in den Abbildungen nicht mit einer Null sondern durch ein Fragezeichen gekennzeichnet. Künftige Untersuchungen zur dynamischen Modellierung künftiger Input- und Outputströme müssten die Altersstruktur und die Lebensdauer der Materialkohorten als Bestandteil der Infrastruktursysteme detaillierter erfassen.

Tab. 154 zeigt im Überblick welche Daten für die jeweiligen Infrastrukturbereiche erhoben werden konnten und welche nicht.

Tab. 154: Übersicht über die erfolgten Berechnungen

		Bestand	Erweiterung	Erneuerung/ Sanierung	Rückbau
Verkehrsinfrastruktur	Straßen	ja	ja	ja	Nein
	Ingenieurbauwerke Bundesfernstraßen	ja	nein	ja	Nein
	Schienen	ja	ja	ja	Nein
	Wasserstraßen	ja	ja	ja***	Nein
Wasserinfrastruktur	Talsperren	ja	ja	nein	Nein
	Wasserwerke	ja	nein	nein	Nein
	Leitungsnetz	ja	ja	ja	ja**
	Wasserspeicher	ja	ja	ja	Nein
Abwasserinfrastrukturen	Kanalnetz	ja	ja	ja	ja**
	Schächte	ja	ja	ja	ja**
	Regenentlastung	ja	Ja	Nein	Nein
	Kläranlagen	ja	Ja	Nein	Ja
Energieerzeugung	Steinkohle	ja	ja	ja	Nein
	Braunkohle	ja	ja	ja	Nein
	Erdgas	ja	ja	ja	Nein
	Wasserkraft	ja	nein	ja	Nein
	Windkraft	ja	ja	nein	ja*
	Kernenergie	ja	nein	ja	Ja
	BHKW	ja	ja	ja	Nein
	Biogas	ja	ja	ja	Nein
Energieverteilung	Stromnetz	ja	ja	ja	ja**
	Gasnetz	ja	ja	ja	ja**
	Fernwärme	ja	nein	nein	Nein
	Nahwärme	ja	nein	nein	Nein

*im Rahmen von Re-Powering

**im Rahmen von Erneuerung

***nicht vollständig

Quelle: Eigene Zusammenstellung

6.1 Straßeninfrastruktur

Große Teile der anfallenden Bauabfälle werden als erneutes Baumaterial im Straßenbau eingesetzt. Dies sind zum einen Materialien, die direkt auf der Straßenbaustelle anfallen, oder Bauabfälle aus dem Hochbau, die in Trag- und Frostschutzschichten eingesetzt werden können. Laut der Arbeitsgemeinschaft Kreislaufwirtschaftsträger Bau (ARGE KWTB 2007) fielen im Jahr 2004⁸⁵ ca. 200 Mio. Tonnen mineralische Bauabfälle an. Rund 64 % (128 Mio. Tonnen) der mineralischen Bauabfälle waren Bodenaushub, der häufig zur Verfüllung in Baugruben, aber auch zur Modellierung von Lärmschutzwällen, verwendet wird.⁸⁶ Weiterhin fielen 19,7 Mio. Tonnen Straßenaufbruch sowie 50,5 Mio. Tonnen Bauschutt und 1,9 Mio. Tonnen Baustellenabfälle an. Von den 19,7 Mio. Tonnen Straßenaufbruch wurden 93,4 % (18,4 Mio. Tonnen) rezykliert. Die Recyclingrate im Bereich des Bauschutts ist dagegen geringer als beim Straßenaufbruch (31 Mio. Tonnen oder 62 %). Die rezyklierten Bauschuttabfälle (sogenannte RC-Baumaterialien, also Recycling-Baumaterialien) werden zu großen Teilen als Füllmaterial im Straßenbau eingesetzt. Ein hochwertiges Recycling im Hochbau findet derzeit nur unzureichend statt. Von den knapp 50 Mio. Tonnen RC-Baustoffen werden 33 Mio. Tonnen im Straßenbau verwendet. Das heißt von den rund 125 Mio. Tonnen mineralischen Rohstoffen, die nach unserer Berechnung jedes Jahr für den Aus- und Neubau sowie der Instandhaltung im Straßenbau aufgewendet werden müssen, können nach den Abfallstatistiken der ARGE KWTB 26,4 % durch RC-Baustoffe ersetzt werden. Allerdings sind in diesen Statistiken nur die Bauabfälle erfasst, die unter den Abfallbegriff fallen, d.h. die zunächst abgegeben werden und erst danach eine Aufbereitung erfahren. Bauabfälle, die direkt an Ort und Stelle rezykliert werden, sind in diesen Statistiken dagegen nicht erfasst.

Damit ist zu vermuten, dass Teile der Straßenbauabfälle statistisch nicht ermittelt werden, da den Mengen an jährlichen Inputs für die Instandhaltung Abbruchmengen in ähnlicher Größenordnung gegenüber stehen müssten. Zwar kommt es auch vor, dass neuere Straßenschichten auf ältere gebaut werden und die Straßen damit in der Höhe wachsen. Ob damit aber die Diskrepanz zwischen der Menge an Materialien für Instandhaltung und dem offiziellen Straßenaufbruch zu erklären ist, muss in dieser Studie offen bleiben.

In den Daten des EcolInvent-Reports „Building Material Disposal“ (Doka 2007) wird zumindest für die Schweiz von einer 100 % Recyclingquote für den Straßenaufbruch ausgegangen. Weiterhin wird für die Schweiz der Recyclinganteil, der direkt an der Baustelle erfolgt, mit rund 80 % angegeben. Übertrüge man diese Werte auf Deutschland würden ca. 98,5 Mio. Tonnen Straßenaufbruch in Deutschland pro Jahr anfallen (d.h. die Menge von 19,7 Mio. Tonnen aus der Statistik der ARGE KWTB wären identisch mit den 20 %). Zusammen mit den 33 Mio. Tonnen RC-Baustoffen aus Bauabfällen, die im Straßenbau eingesetzt werden, würden die anfallenden RC-Materialien die

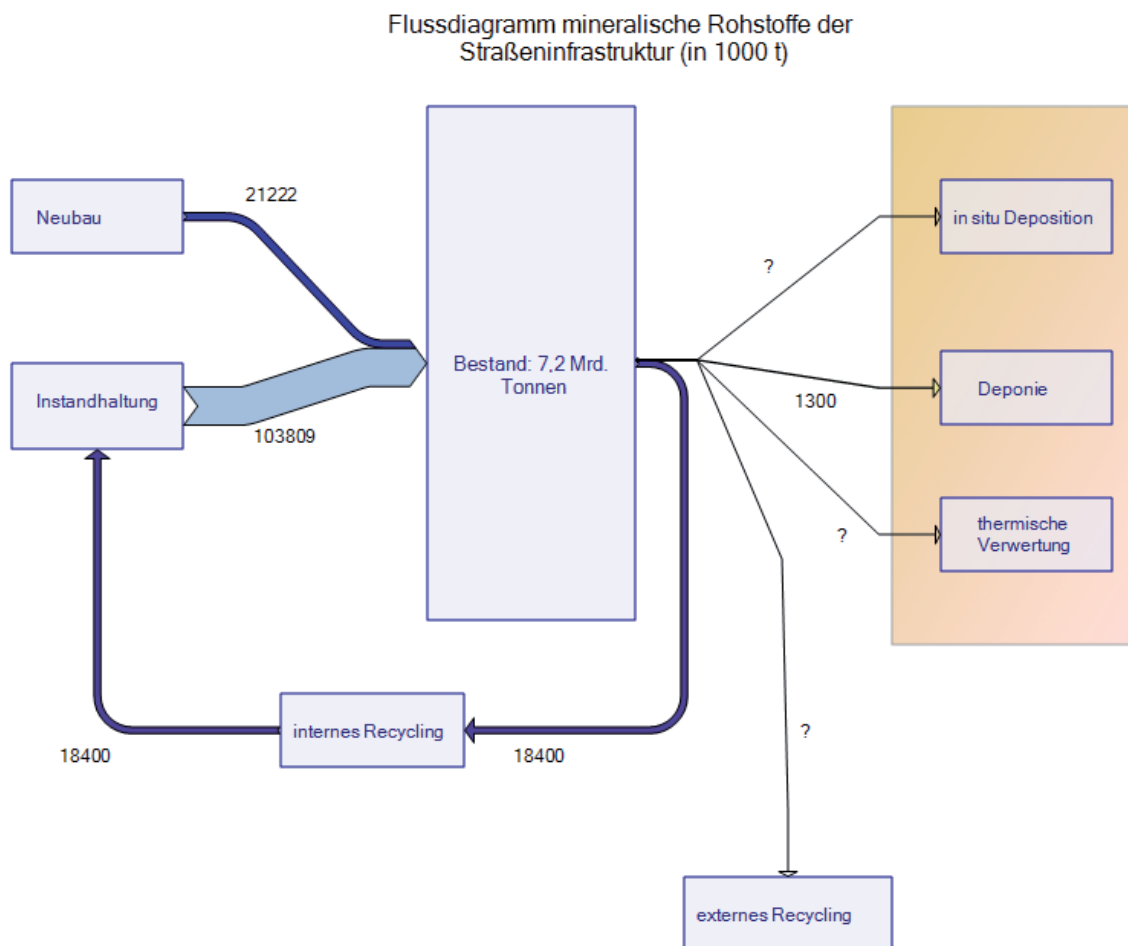
⁸⁵ Neuere Daten für Gesamtdeutschland liegen nicht vor.

⁸⁶ Die Verwendung ist regional sehr unterschiedlich und ist stark abhängig von den örtlichen Gegebenheiten (IFEU 2009).

hochgerechneten jährlichen benötigten Mengen an Baumaterialien im Straßenbau übertreffen. Dies würde wiederum bedeuten, dass keinerlei Primärmaterial im Straßenbau mehr eingesetzt werden müsste. Eine Schlussfolgerung, die nicht plausibel erscheint. Vielmehr werden vermutlich Materialien aus dem Straßenaufbruch auch für Baumaßnahmen verwendet, die nicht in unserer Abschätzung des Materialbestandes der Straßeninfrastruktur enthalten sind, z.B. Lärmschutzwälle an Bundesautobahnen.

Um diesen Unsicherheiten der Datensituation zu entsprechen, werden für die Output-Ströme in Abb. 12: "Flussdiagramm mineralische Rohstoffe Straßeninfrastruktur" nur die offiziellen Zahlen zum Anfall von Straßenaufbruch verwendet, der zu 93 % als RC-Baumaterial wieder im Straßenbau eingesetzt wird.

Abb. 12: Flussdiagramm mineralische Rohstoffe Straßeninfrastruktur

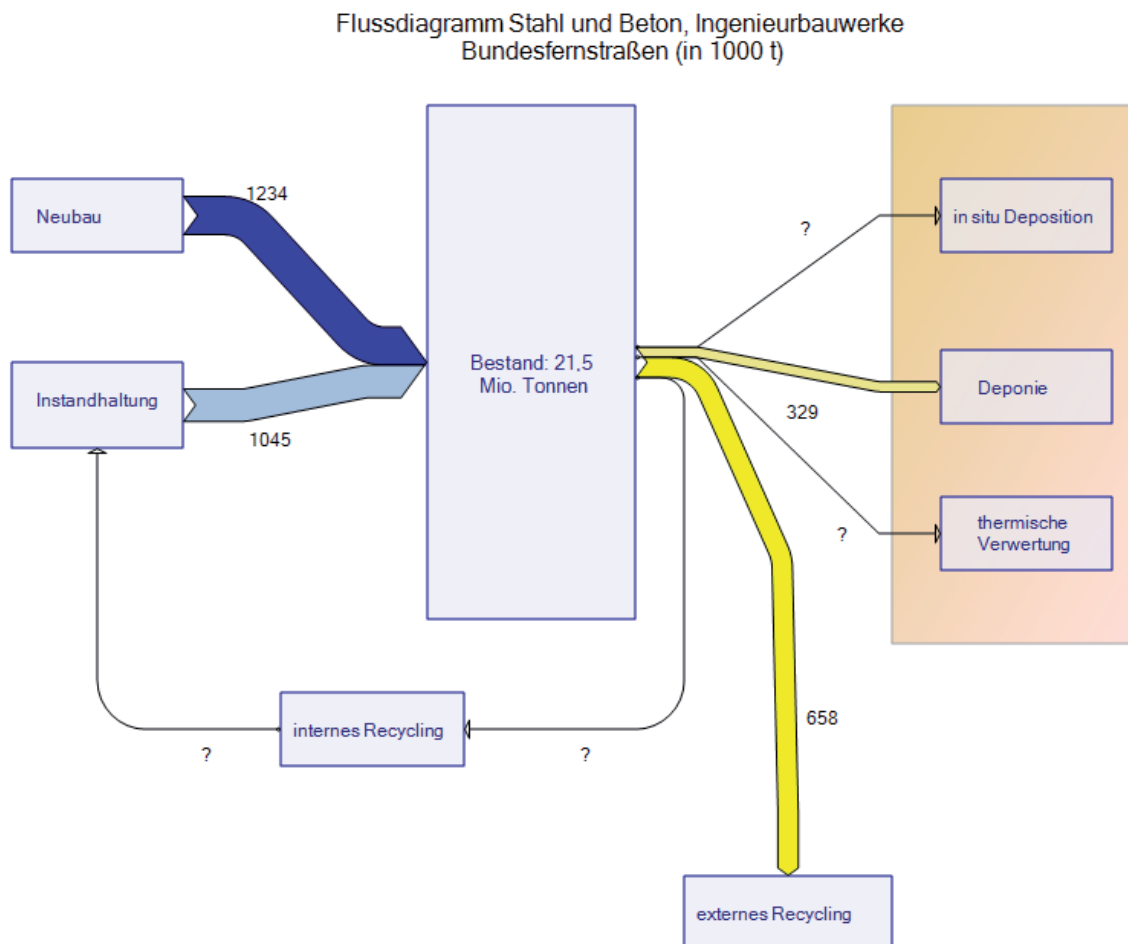


Quelle: Eigene Berechnung

6.2 Ingenieurbauwerke der Bundesfernstraßen

Über die anfallende Menge und die Art der Verwendung der Abbruchmassen in der Instandhaltung von Ingenieurbauwerken der Bundesfernstraßen liegen keinerlei Daten vor. Wir haben daher für die Ingenieurbauwerke der Bundesfernstraßen den Mengen für Instandhaltung entsprechende Abbruchmengen gegenübergestellt. Wir gehen dabei von einem 70 %-Recycling von Bewehrungs- und Spannstahl aus. Für Baustahl wird dagegen eine höhere Recyclingrate von 90 % vermutet. Für mineralische Rohstoffe, hier also Beton, wird die in der Bauabfallstatistik angegebene Recyclingquote von 62 % für Bauschutt unterstellt. Für die restlichen Mengen an Stahl und Beton wird eine Deponierung der Abbruchmassen unterstellt.

Abb. 13: Flussdiagramm für Stahl und Beton in Ingenieurbauwerken der Bundesfernstraßen



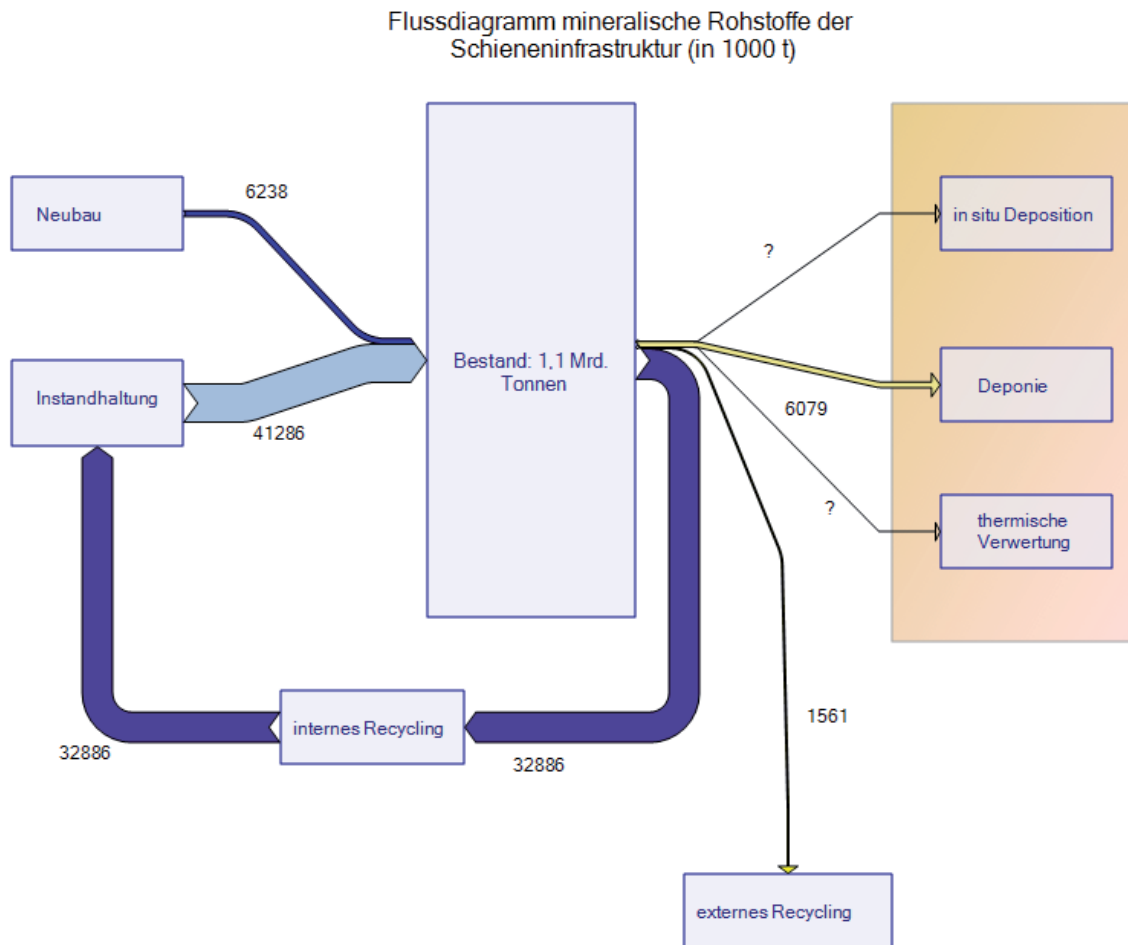
Quelle: Eigene Berechnung

6.3 Schieneninfrastruktur

Auch im Bereich der Schieneninfrastruktur sind über den Verbleib der Abbruchmassen durch Rückbau oder Instandhaltung nur wenige Informationen vorhanden. So ist z.B. unklar, welcher Anteil des jährlichen Austausches an Gleisschotter nach der Reinigung wieder als Gleisschotter verwendet wird. In Spielmann et al. (2007) wird der Anteil mit 80 % angegeben. Rund 20 % des mit Schwermetallen und Ölen kontaminierten Gragnitschotters wird danach deponiert. Für die Darstellung der Materialflüsse für Instandhaltung verwenden wir die Daten, die sich aus der technischen Lebensdauer ergeben. Wie im Kapitel 3.3 beschrieben, scheinen die über die Lebensdauer geschätzten Materialmengen für die Instandhaltung besser mit den Angaben der Deutschen Bahn hinsichtlich ihrer Aufwendungen zur Instandhaltung überein zustimmen, als über den jährlichen Ersatzbedarf aus Schmied/Mottschall (2010).

Neben einer 80 %igen internen Wiederverwertung des Schotters, gehen wir für die restlichen mineralischen Rohstoffe wie Schwellen, Mauerwerk etc. von einer Recyclingquote von 62 % aus. Die restlichen 38 % der mineralischen Abbruchmassen werden deponiert. Der Erneuerungsbedarf für Sand und Kies, der im Planum verbaut ist, wird nach unserer Abschätzung komplett intern wieder als Unterbau verwendet. Die rechnerischen Abbruchmengen der Ingenieurbauwerke der Schieneninfrastruktur werden analog zu den Ingenieurbauwerken der Straßeninfrastruktur behandelt. Daraus ergeben sich für die mineralischen Rohstoffe folgende Input- und Outputflüsse:

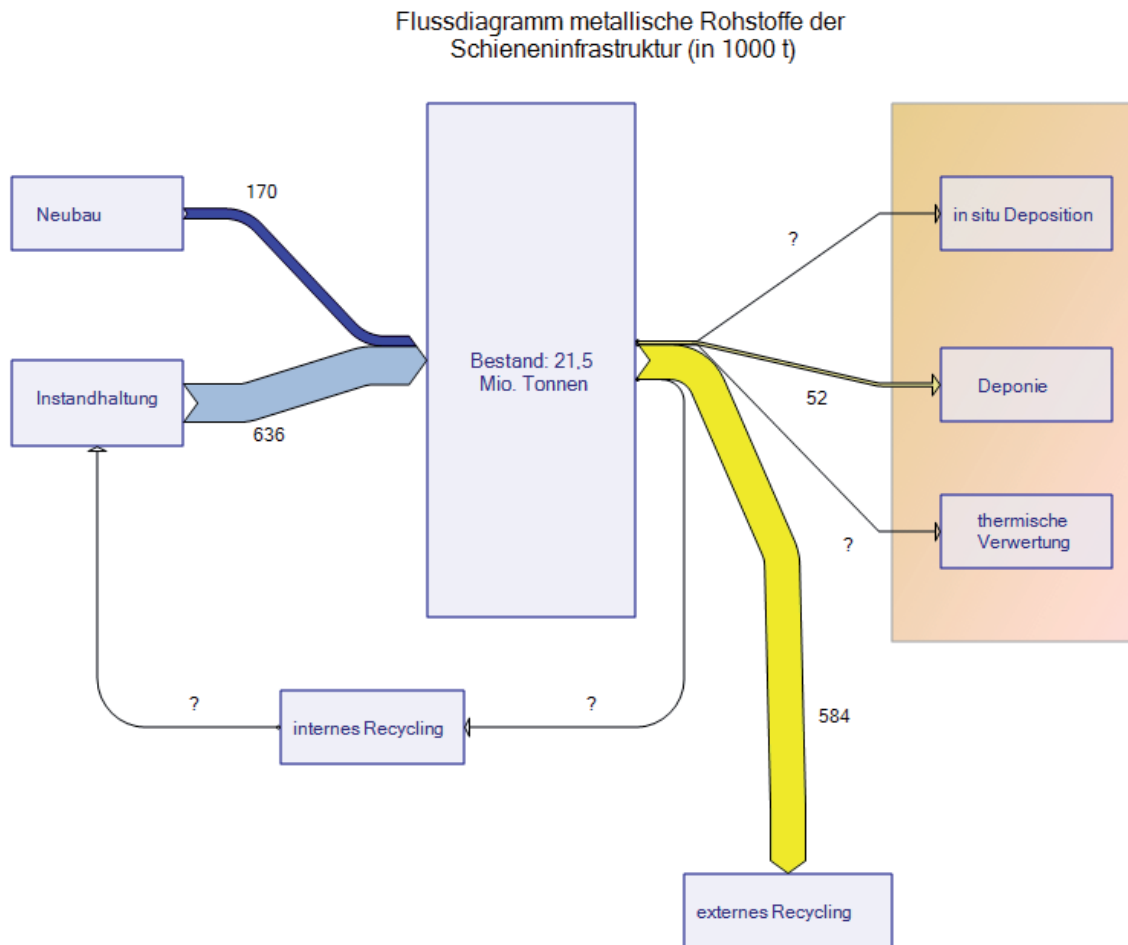
Abb. 14: Flussdiagramm der mineralischen Rohstoffe der Schieneninfrastruktur (ohne Metalle)



Quelle: Eigene Berechnung

Weiterhin gehen wir davon aus, dass sämtliche metallische Rohstoffe zu Teilen extern recycelt werden. Für den Primärstahl der Schienen sowie für die Menge an Kupfer und Bronze der Oberleitungen wird ein vollständiges Recycling unterstellt. Allerdings ist unklar, wie hoch der dissipative Verlust durch Abnutzung und vor allem durch das Abschleifen im Rahmen der Instandhaltung ist. Dieser wurde daher nicht berücksichtigt. Für die restliche Stahlfraktion für Signaltechnik, Masten etc. wird ein Recyclinganteil von 70 % unterstellt, für Aluminium von 90 %. Die nicht recycelten Metalle (in erster Linie Bewehrungsstahl der Gebäude) werden nach unserer Einschätzung mit Teilen des Bauschutts deponiert (Abb. 15):

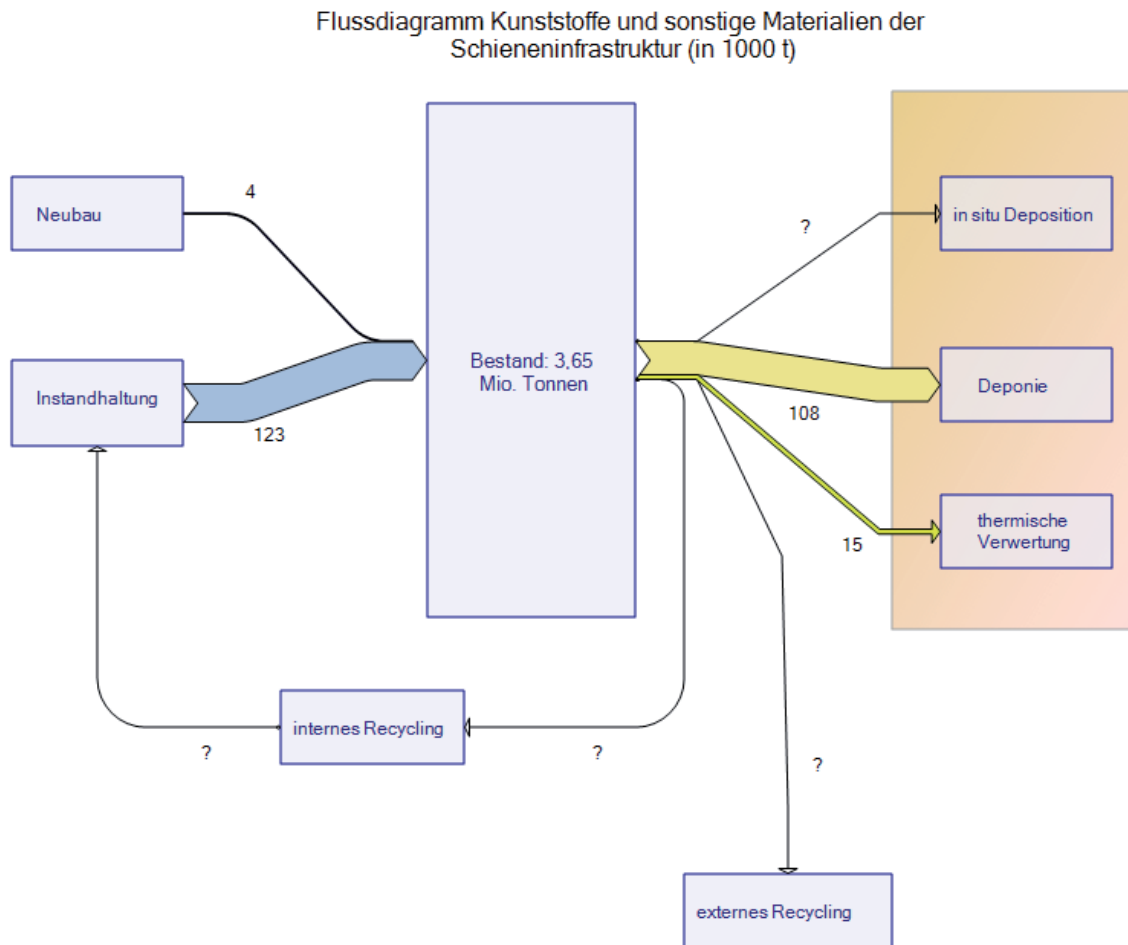
Abb. 15: Flussdiagramm der metallischen Rohstoffe der Schieneninfrastruktur



Quelle: Eigene Berechnung

Holzschwellen mit Teerölimprägnierung müssen seit einigen Jahren ordnungsgemäß entsorgt werden. Sie werden in der Regel deshalb entweder deponiert oder thermisch verwertet. Da keine Angaben zur genauen Entsorgung vorhanden sind, wird die Menge an anfallenden Holzabfällen dem Output-Fluss „Deponie“ zugerechnet. Von der Kunststofffraktion wird angenommen, dass sie thermisch verwertet wird (Abb. 16):

Abb. 16: Flussdiagramm Kunststoffe und sonstige Materialien der Schieneninfrastruktur



Quelle: Eigene Berechnung

6.4 Wasserstraßen

Die jährlichen Flüsse im Bereich der Infrastrukturen der Wasserstraßen werden bestimmt durch den (Ersatz-)Neubau der Ingenieurbauwerke sowie die Erweiterung der Umschlaganlagen.⁸⁷ Die Daten für die Instandhaltung sind höchstwahrscheinlich unterschätzt, da nur die Instandhaltung der Ingenieurbauwerke berechnet wurde.

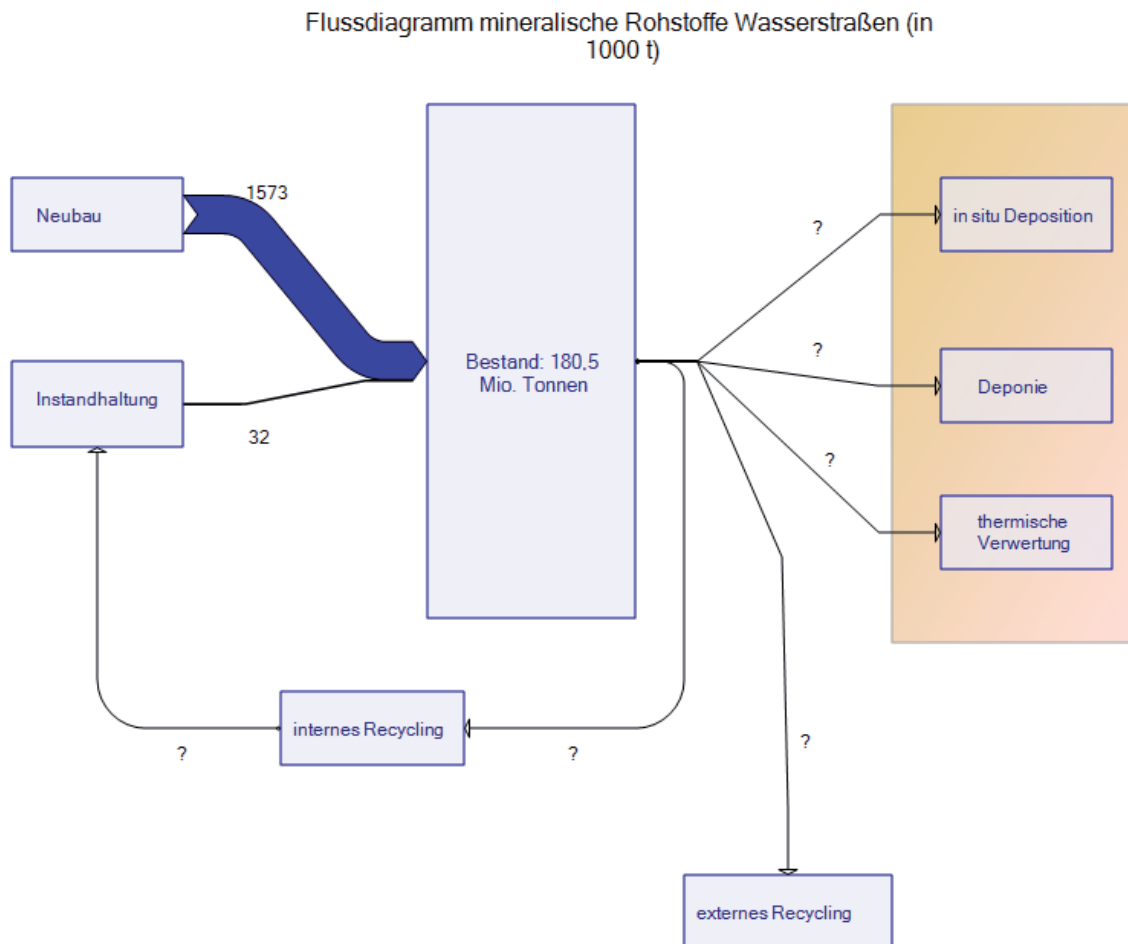
In den meisten Fällen erfolgt ein Neubau zusätzlich zu den alten Ingenieurbauwerken. In seltenen Fällen erfolgt ein Abbruch. Durch den Erdbau anfallende Massen werden in der Regel zwischen gelagert und wieder eingebaut. Für den Erdbau unbrauchbare Böden werden in Form von ökologischen Ausgleichsmaßnahmen auf dem Baugelände abgelagert, landschaftsgerecht gestaltet und begrünt (Quelle: Fockenberg et al. 2005). Alternativ wird das Aushubmaterial auf dem Wasserweg abtransportiert, um einer

⁸⁷ Der Streckenausbau der Wasserstraßen wird mangels Daten nicht berücksichtigt.

Wiedernutzung zugeführt zu werden (Pogalens, Lenz 2008). Beim Abbau alter Schleusen anfallender Beton wird vor Ort mit dem Stemmbagger zerkleinert und als Recyclingmaterial z.T. für den Wegebau der neuen Schleuse wieder verwendet (Saathoff et al. 2009). Genauere Daten über die Anteile liegen jedoch nicht vor. Wegen der Langlebigkeit des Werkstoffs Stahl können viele Produkte oder Teile davon aufgearbeitet und weiterverwendet werden. So können Spundwände z.T., sofern sie nicht verbogen sind, aus dem Boden gezogen und an anderer Stelle wieder eingerammt werden.

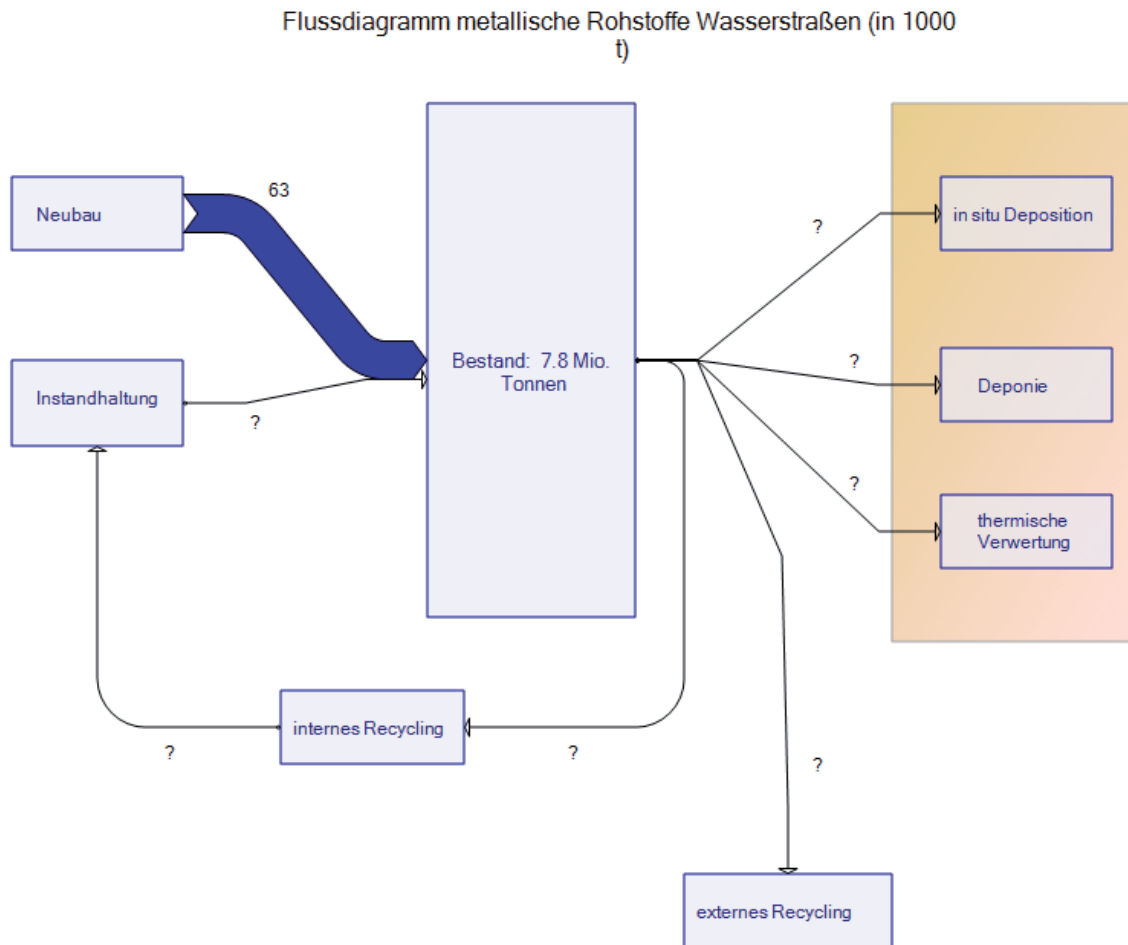
Da über die Output-Massen keine verlässlichen Daten vorliegen und keine Hochrechnung der Instandhaltung über die Lebensdauer erfolgt ist, können diese in den Flussdiagrammen nicht berücksichtigt werden.

Abb. 17: Flussdiagramm der mineralischen Baustoffe in Wasserstraßen – Infrastrukturen



Quelle: Eigene Berechnungen

Abb. 18: Flussdiagramm der metallischen Rohstoffe in Wasserstraßen



Quelle: Eigene Berechnungen

6.5 Wasserinfrastruktur

Tab. 155 gibt einen Überblick über den Bestand und die jährlichen Materialflüsse im Bereich der Wasserinfrastrukturen, basierend auf unseren Berechnungen.

Tab. 155: Jährliche Materialflüsse Wasserinfrastrukturen

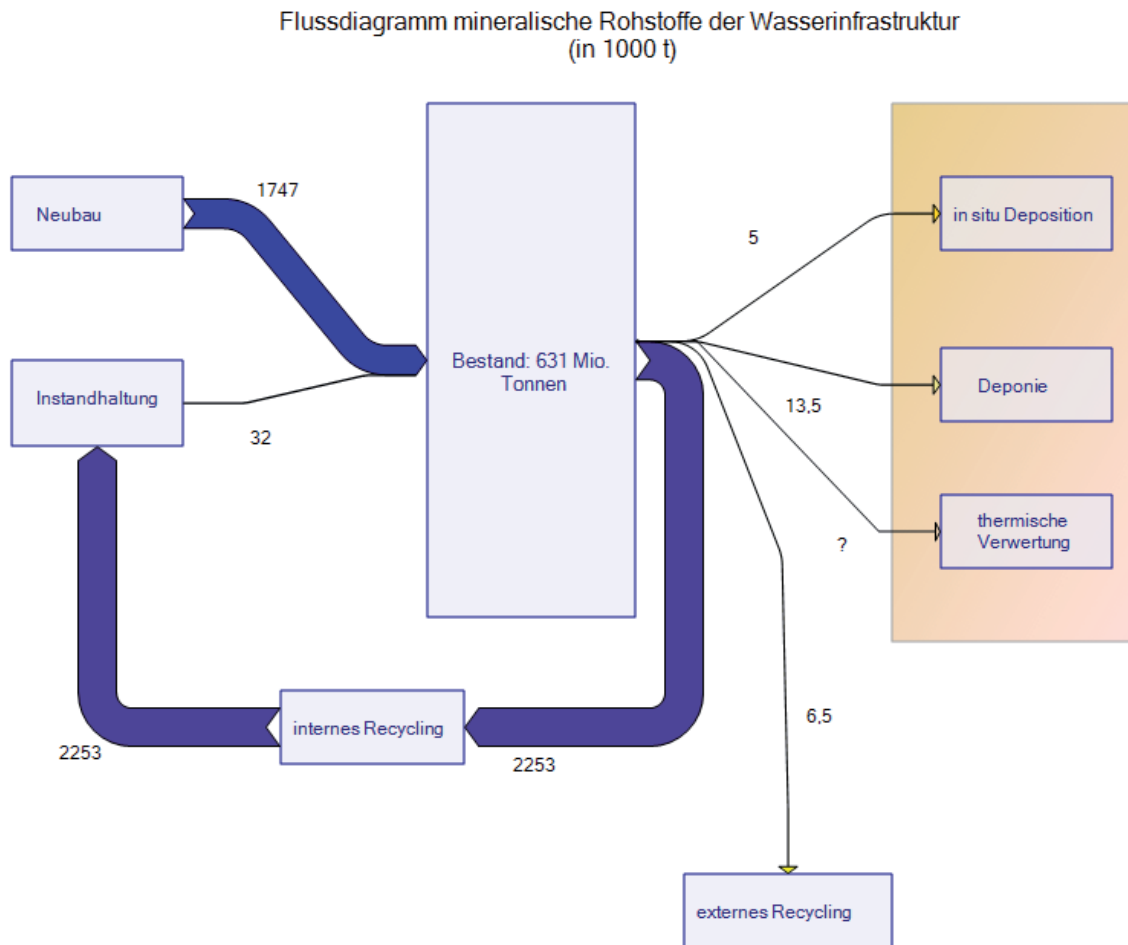
in 1.000t		Bestand	Input Neu- bau	Input Instand- haltung	Output In- standhaltung	davon Abbruch
mineralische Rohstoffe	Kies/Sand	423.642	1.525			
	Naturstein	55.458	144			
	Beton	148.747	73		6	4,8
	Faserzement	1.106			12	9,6
	Zementmörtel	688	5	32	7	5,6
	Quarzsand	893				
	gesch. Vermicu- lit	62				
	Ziegel	577				
metallische Rohstoffe	Guss-/ Roheisen	8.215	13	24	80	64
	Stahl	3.781	11	42	16	12,8
	Kupfer	12				
	Zink	13				
Kunststoffe / Sonstige	PVC	641			5	4
	PE / PEHD	293	5	12	2	1,6
Summe mineralische Rohstoffe		631.173	1.747	32	25	20
Summe metallische Rohstoffe		12.021	24	66	96	76,8
Summe Kunststoffe / sonstige		934	5	12	7	5,6
Summe gesamt		644.128	1.776	110	128	102,4

Quelle: Eigene Berechnungen, Details in vorangegangenen Tabellen

Der jährliche Material-Input für Neubau und Erweiterung im Bereich der Wasserinfrastrukturen setzt sich zusammen aus dem Neubau von Talsperren (überwiegend für Hochwasserschutz-Zwecke), Wasserspeichern sowie einem sehr geringen Ausbau des Leitungsnetzes. Die jährlichen Materialflüsse zur Erneuerung und Instandhaltung umfassen die jährliche Erneuerung des Leitungsnetzes basierend auf einer geschätzten tatsächlichen Erneuerungsrate sowie der Instandhaltung der Wasserspeicher. Die Instandhaltung der Talsperren, Wasserwerke und des Leitungsnetzes wird aufgrund fehlender Daten und/oder sehr inhomogener Verfahren vernachlässigt.

Bezüglich der Verlegeverfahren im Rohrnetz kann unterstellt werden, dass 80 % der Erneuerung in offener Bauweise erfolgt (analog zum Kanalnetz). Damit verbleiben 20 % der erneuerten Rohrleitungen (etwa 25.000 Tonnen) in-situ im Bodenreich. Bezüglich der offenen Erneuerung unterstellen wir, dass die Altrohre gehoben und in Abhängigkeit vom Werkstoff einer Weiterverwertung oder Deponierung zugeführt werden. Prinzipiell gilt, dass bezüglich der Leitungsnetze der jährliche Materialinput durch Erneuerung unter dem jährlichen Materialoutput durch Erneuerung liegt, da Leitungen aus Zement, Beton und Gusseisen zunehmend gegen (leichtere) Kunststoff-Rohre ersetzt werden. Die Sandbettung der offenen Erneuerung wird wiederverwendet und ist als internes Recycling in Abb. 19 dargestellt.

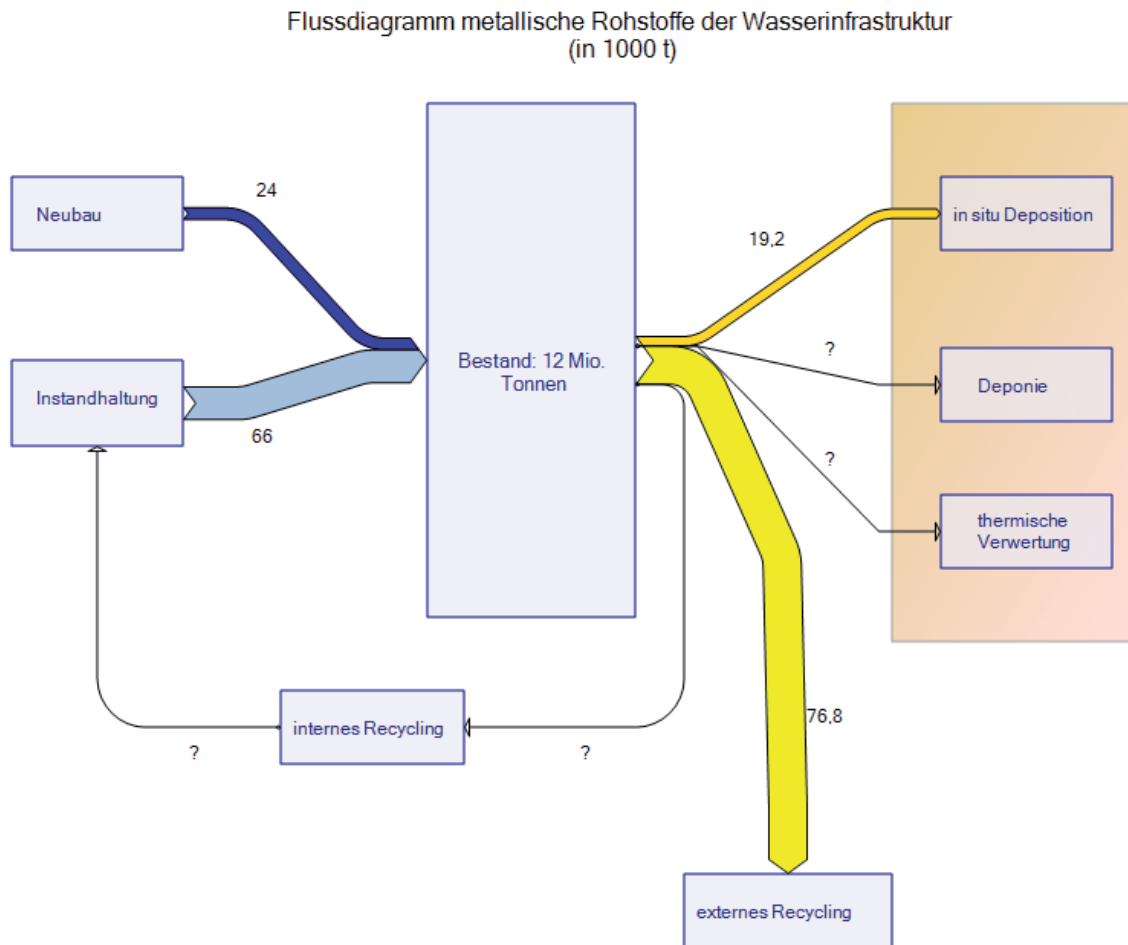
Abb. 19: Flussdiagramm der jährlichen Materialflüsse in Wasserinfrastrukturen



Quelle: Eigene Berechnungen

Analog zu den Ingenieurbauwerken wird für die mineralischen Rohstoffe (Beton und Zementmörtel) die in der Bauabfallstatistik angegebene Recyclingquote von 62 % für Bauschutt unterstellt. Für die restlichen Mengen wird eine Deponierung unterstellt. Knapp 10.000 Tonnen Faserzement werden durch den Ersatz der alten Asbestzementrohre gehoben und unseren Annahmen zufolge einer Deponierung zugeführt. Bzgl. der Rohrbettung wird eine direkte Wiederverwendung vor Ort angenommen.

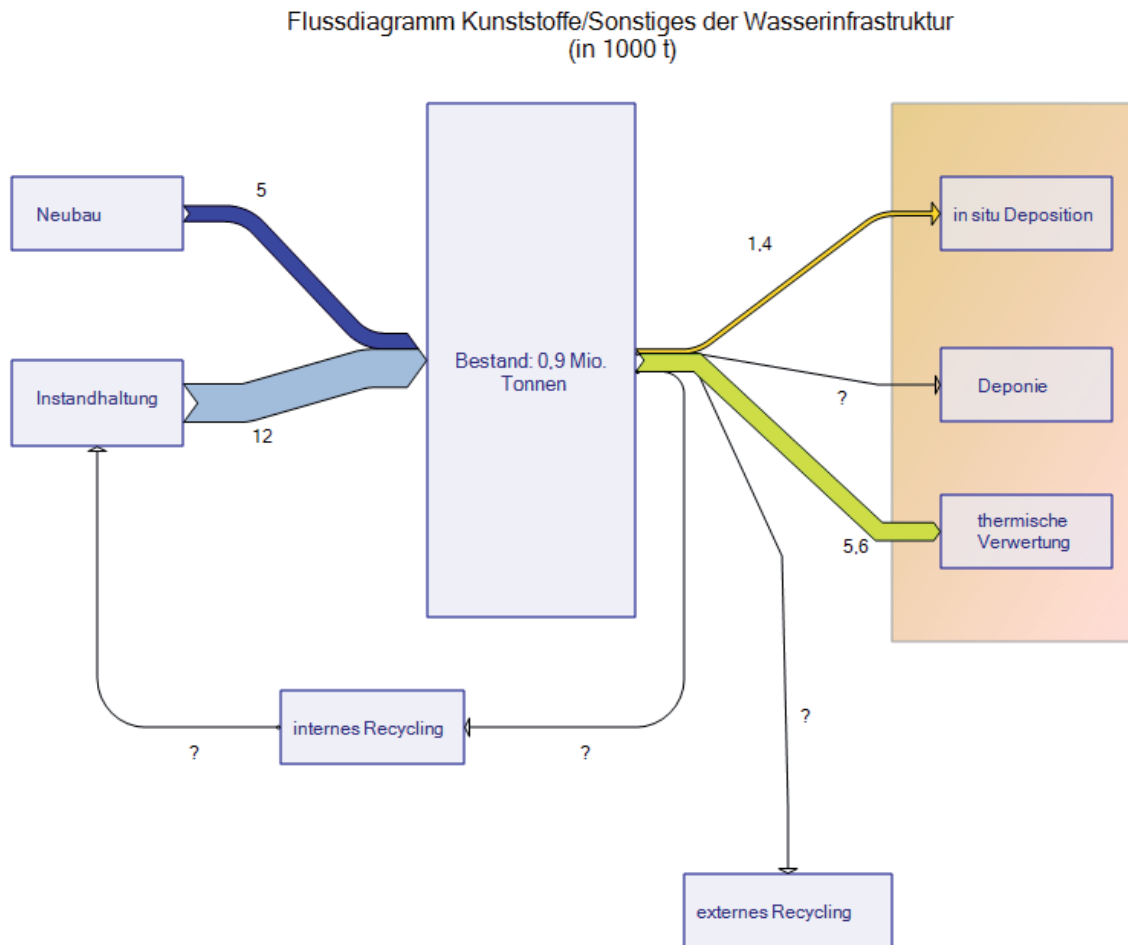
Abb. 20: Flussdiagramm der metallischen Rohstoffe in Wasserinfrastrukturen



Quelle: Eigene Berechnungen

Die jährlichen Materialflüsse der metallischen Rohstoffe in Wasserinfrastrukturen werden bestimmt durch die Erweiterung und insbesondere Erneuerung der Leitungsnetze. Hier verbleiben wiederum bei geschlossener Erneuerung die Rohre im Boden, wohingegen bei offener Erneuerung eine Weiterverwertung von 100 % unterstellt wird (siehe auch Windsperger et al. 1999).

Abb. 21: Flussdiagramm der Kunststoffe und sonstigen Materialien in Wasserinfrastrukturen



Quelle: Eigene Berechnungen

Die jährlichen Materialflüsse von Kunststoffen sind bestimmt von der Erneuerung des Leitungsnetzes. Durch den zunehmenden Trend zur Verwendung von Kunststoffrohren ist hier der jährliche Materialinput höher als der Materialoutput. Letzterer kann wiederum in Abhängigkeit von der Verfahrensweise differenziert werden in 20 % in-situ-Verbleib sowie 80 % thermische Verwertung.

6.6 Abwasserinfrastruktur

Tab. 156 gibt einen Überblick über den Bestand und die jährlichen Materialflüsse im Bereich der Abwasserinfrastrukturen, basierend auf unseren Berechnungen.

Tab. 156: Jährliche Materialflüsse Abwasserinfrastrukturen

in 1.000 t		Bestand	Input Neu- bau	Output Neubau	Input Instand- haltung	Output In- standhaltung
mineralische Rohstoffe	Kies/Sand	734.897	11.449			
	Kalksandstein	3.571	4	21		
	Beton	326.765	3.202	612	561	650
	Kanalklinker	19.631				88
	Zementmörtel	5.459	9		2	24
	Glaswolle	89				
	Steinzeug	18.483	327		77	83
	Flachglas	7				
metallische Rohstoffe	Guss-/ Rohei- sen	347	7		1	1
	Stahl	7.734	36	28	5	
	Kupfer	81				
	Aluminium	18				
Kunststoffe / Sonstige	nicht diff.	720	70		39	2
Summe mineralische Rohstoffe		1.108.902	14.991	633	640	846
Summe metallische Rohstoffe		8.180	43	28	6	1
Summe Kunststoffe / sonstige		720	70	0	39	2
Summe gesamt		1.117.802	15.104	661	685	849

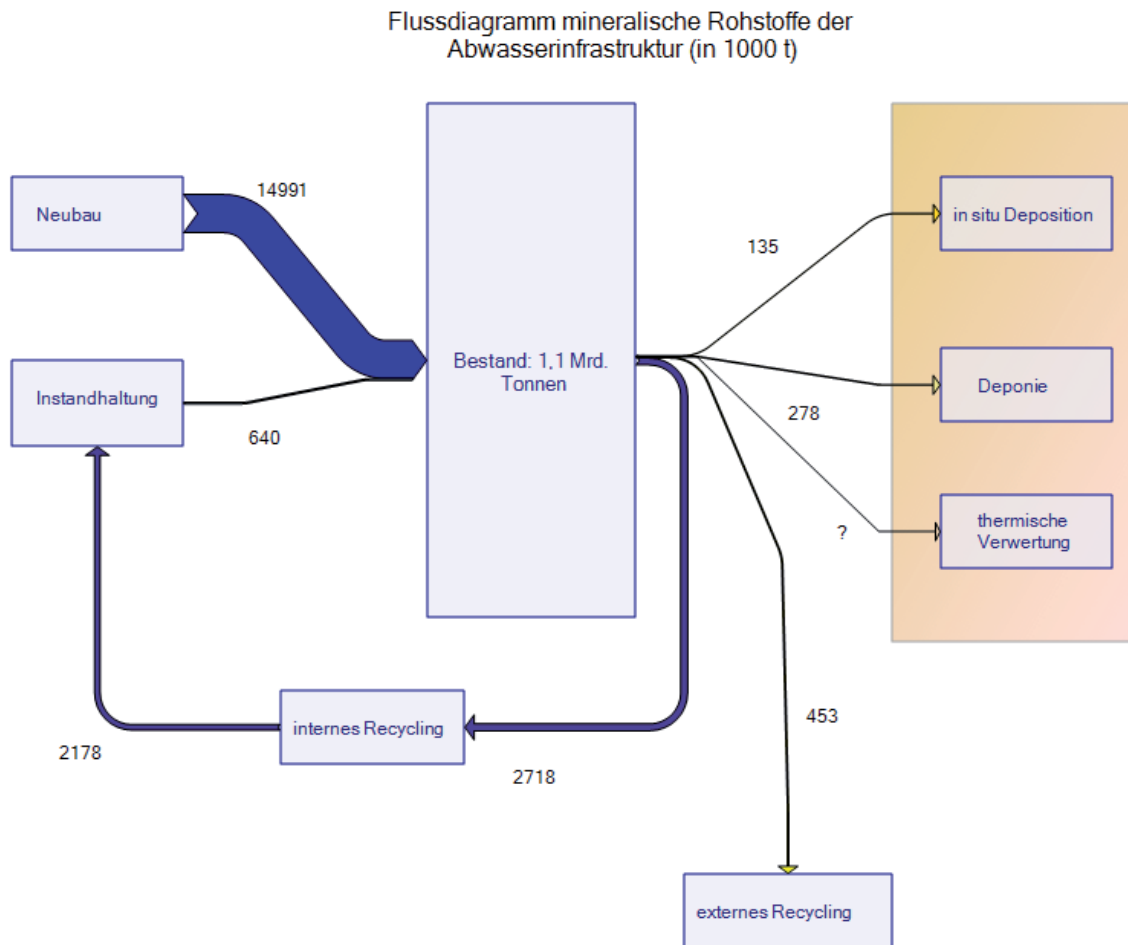
Quelle: Eigene Berechnungen, Details in vorangegangenen Tabellen

Der jährliche Material-Input für Neubau und Erweiterung im Bereich der Abwasserinfrastrukturen setzt sich zusammen aus der Erweiterung des Kanalnetzes und damit verbunden der Schächte, der Regenentlastung sowie der Zunahme der Anzahl der Kläranlagen. Darüber hinaus sinkt nach der offiziellen Statistik (Destatis 2009) die Anzahl der Kläranlagen in einzelnen Größenklassen, was einen (potenziellen) Rückbau der Kläranlagen zur Folge hat.⁸⁸

Die jährlichen Materialflüsse zur Erneuerung und Instandhaltung umfassen die jährliche Erneuerung des Kanalnetzes in offener (80 %) und geschlossener (20 %) Bauweise sowie die jährliche Erneuerung der zugehörigen Schächte. Im Zuge der geschlossenen Erneuerung des Kanalnetzes verbleiben die Rohre im Boden. Bezüglich der offenen Erneuerung unterstellen wir, dass die Altrohre gehoben und in Abhängigkeit vom Werkstoff einer Weiterverwertung oder Deponierung zugeführt werden. Prinzipiell gilt, dass für die Kanalisation der jährliche Materialinput durch Erneuerung unter dem jährlichen Materialoutput durch Erneuerung liegt, da Kanäle aus Mauerwerk, Steinzeug und Beton zunehmend gegen (leichtere) Kunststoff-Rohre ersetzt werden.

⁸⁸ Hier kann aufgrund fehlender Informationen nicht verlässlich ermittelt werden, ob diese Kläranlagen tatsächlich zurückgebaut werden.

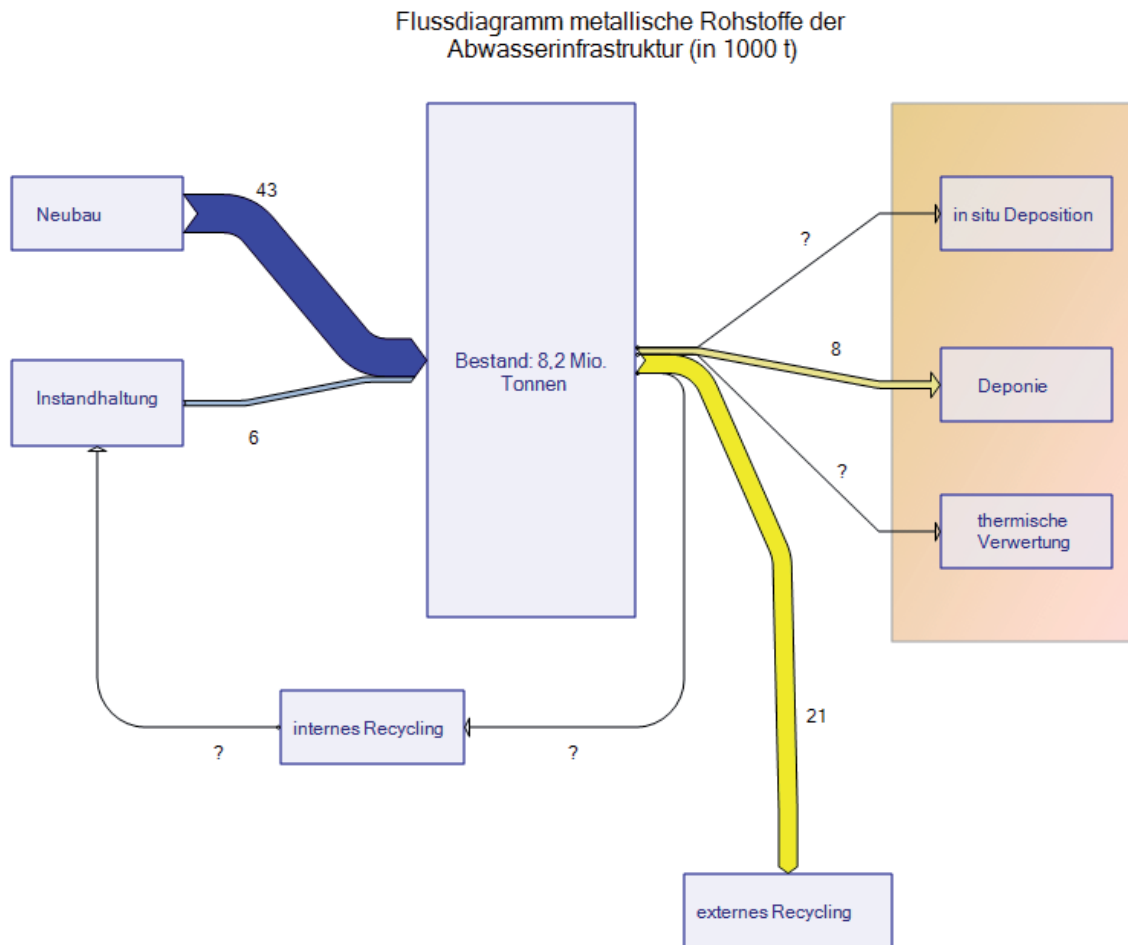
Abb. 22: Flussdiagramm der mineralischen Rohstoffe in Abwasserinfrastrukturen



Quelle: Eigene Berechnungen

Analog zu den Ingenieurbauwerken wird für die mineralischen Rohstoffe (Beton, Kalksandstein, Kanalklinker, Steinzeug und Zementmörtel) die in der Bauabfallstatistik angegebene Recyclingquote von 62 % für Bauschutt unterstellt. Für die restlichen Mengen wird eine Deponierung unterstellt. Bzgl. der Rohrbettung wird eine direkte Wiederverwendung vor Ort angenommen. Wie bei der Wasserinfrastruktur wird die Sandbettung für die offene Instandhaltung wiederverwendet und als internes Recycling gewertet.

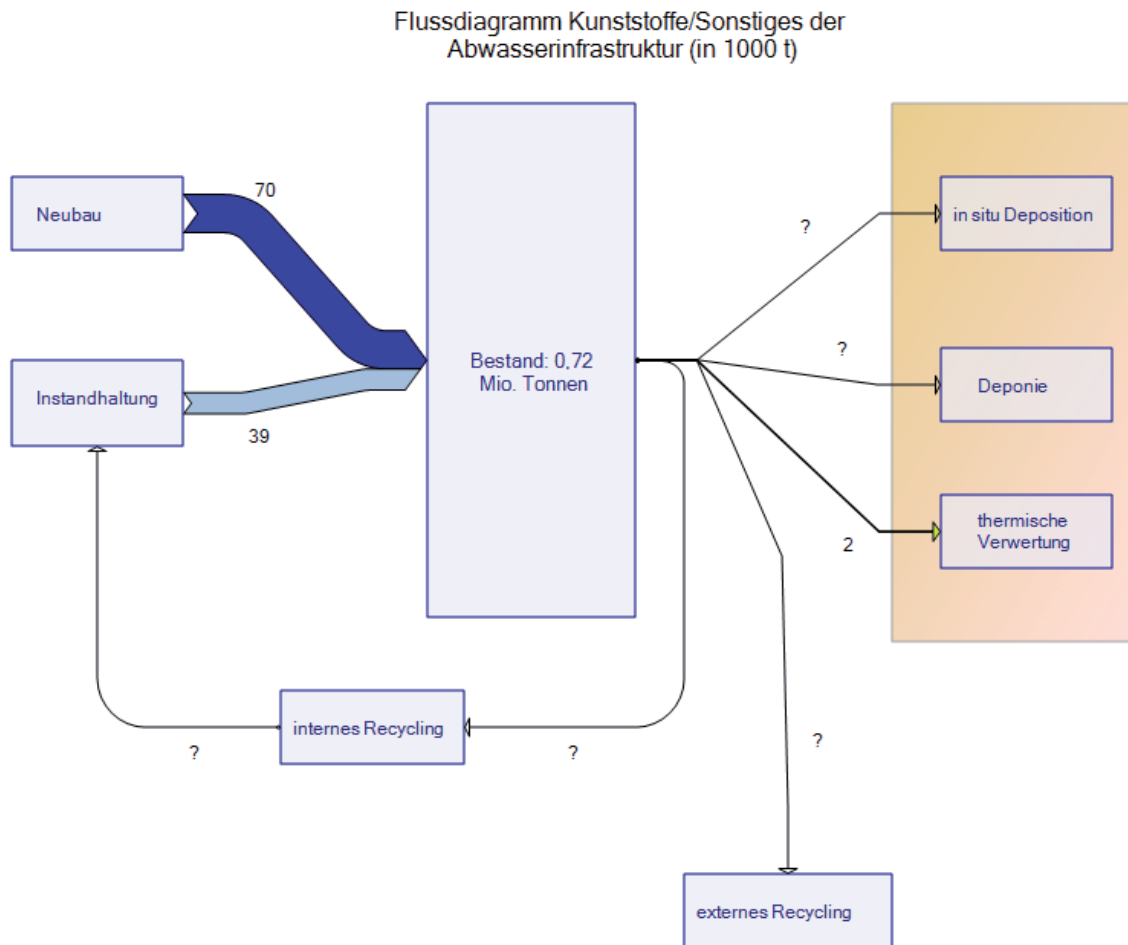
Abb. 23: Flussdiagramm der metallischen Rohstoffe in Abwasserinfrastrukturen



Quelle: Eigene Berechnungen

Die jährlichen Materialflüsse der metallischen Rohstoffe in Abwasserinfrastrukturen werden bestimmt durch den Rückbau der Kläranlagen. Hier gehen wir davon aus, dass die Stahlmassen aus dem Rückbau der Kläranlagen zu 70 % recycelt werden, während der Rest deponiert wird. Rund 1.000 Tonnen Gusseisen fallen jährlich durch die Erneuerung von Kanalschächten an. Diese können problemlos einem externen Recycling zugeführt werden.

Abb. 24: Flussdiagramm der Kunststoffe und sonstigen Materialien in Abwasserinfrastrukturen



Quelle: Eigene Berechnungen

Jährlich fallen nach unseren Berechnungen etwa 2.000 Tonnen Kunststoffe aus der Erneuerung des Kanalnetzes an, welche unseren Annahmen zufolge zu 100 % einer thermischen Verwertung zugeführt werden.

6.7 Energieverteilung

Wie schon in den Abschnitten zur Verkehrs- und Wasser/Abwasserinfrastruktur soll in diesem Kapitel ein Überblick geschaffen werden, welche Informationen über die Abbruchmengen und den Umgang mit diesen Materialmengen für den Bereich der Energieverteilung schon vorhanden sind und welche Informationen zur Beantwortung dieser Fragen noch gesammelt werden müssen. Bei den Gas- und Stromnetzen können wir anhand der monetären Investitionszahlen zwar einerseits zwischen Erneuerung/Erhaltung und andererseits Wartung/Instandhaltung differenzieren. Allerdings wissen wir nicht, wie die monetären Größen der Kategorie Wartung/Instandhaltung zwischen Wartung und Instandhaltung aufgeteilt werden. Während Wartung vor allem

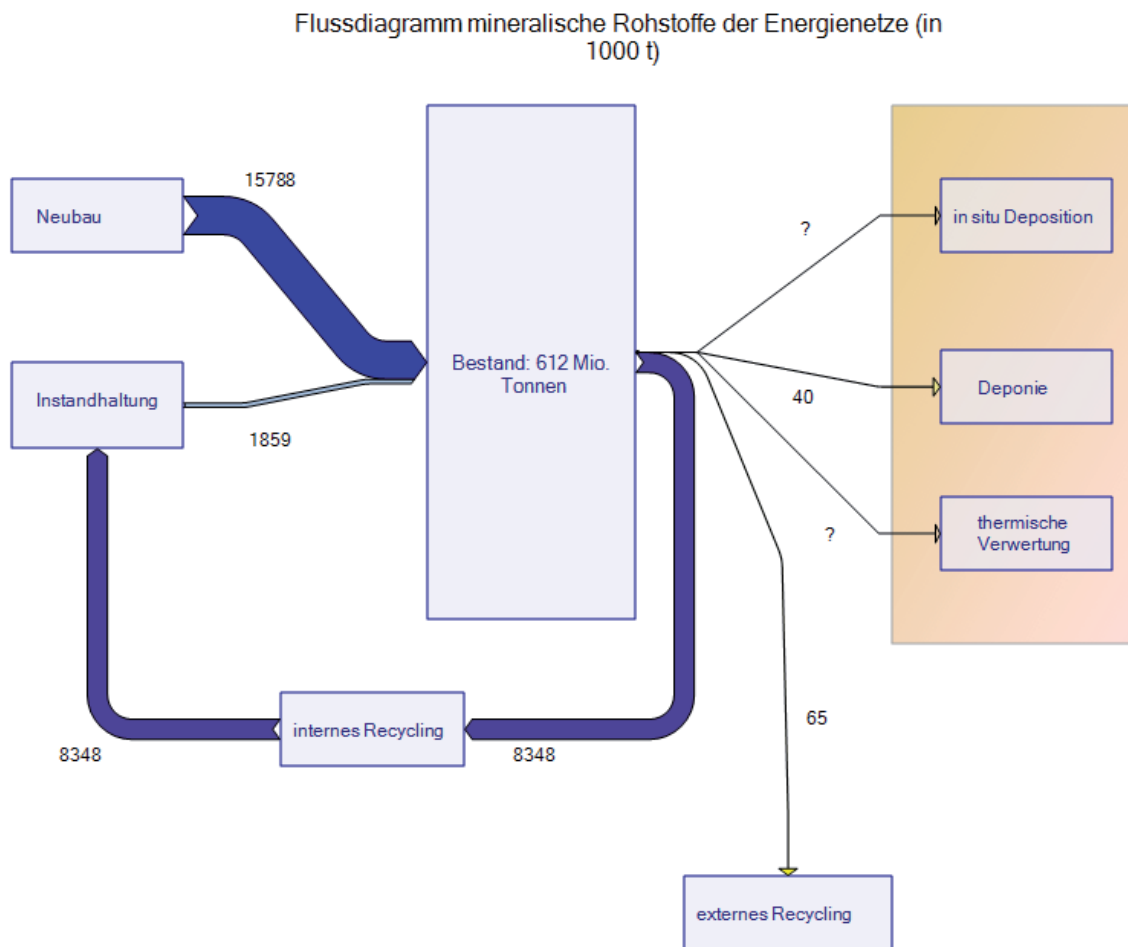
Lohnkosten bzw. regelmäßig anfallende Kosten beinhalten dürfte (z.B. regelmäßige Kontrollen der Erdgastrassen), sind Instandhaltungen auch mit stofflichen Aufwendungen verbunden. Für die Abschätzung der Materialmengen wäre eine Unterscheidung zwischen Instandhaltung und Wartung somit wichtig. Allerdings liegen diese Daten nicht vor. Die Daten der Energieverteilnetze beinhalten daher nur Abschätzungen für die Erneuerung/Ersatz-Investitionen. Für Wärmenetze werden keinerlei jährliche Materialflüsse abgeschätzt.

Wir schätzen, dass der Austausch der Energieverteilungsnetze im Gegensatz zur Wasser- und Abwasserinfrastruktur ohne in-situ-Deponierung durchgeführt wird. Das heißt, ein Verbleib der Stromkabel oder Gasleitungen im Erdreich nach ihrer Nutzung erfolgt nicht. Laut Gesprächen mit Vertretern von Netzbetreibern ist in den Nutzungsverträgen über die benötigten Flächen für Erdkabel und Gasleitungen der Rückbau der Altanlagen in der Regel festgeschrieben. Ob Fundamente von WEA bzw. Freileitungsmasten allerdings vollständig rückgebaut werden, ist in der Literatur umstritten. Wir gehen in dieser Studie von einem vollständigen Rückbau aus. Die Sandbettung für Kabel und Gasleitungen wird in unserer Abschätzung komplett nach der Erneuerung wiederverwendet.

Im Rahmen von Erneuerungsmaßnahmen werden in den Stromnetzen verstärkt Freileitungen durch Kabelleitungen im Erdreich ersetzt. Alte Gasleitungen aus Grauguss und duktilem Guss werden durch neue PE-Rohre ersetzt. Daher sind die abgeschätzten Materialmengen der Erneuerung nicht identisch mit den Abbruchmengen dieser Maßnahmen. Zudem entsteht durch den Anteilszuwachs an Kabelleitungen ein zusätzlicher Sandbedarf für Bettung, der dem Materialfluss für Instandhaltung zugerechnet werden muss.

Der unterstellte Recyclinganteil von 62 % bei mineralischen Rohstoffen, abgeleitet aus der von der ARGE KTBW (2007) publizierte Recyclingrate von 62 % für Bauschutt führt zu einer Aufteilung der Abbruchmengen von 65.000 Tonnen Recycling und 40.000 Tonnen Deponie. Weiterhin wird der Sand für die Sandbettung nach unserem Kenntnisstand nach dem Austausch von Kabeln und Rohren wiederverwendet. Wir gehen daher von einer vollständigen internen Kreislaufführung des verwendeten Sands aus.

Abb. 25: Materialflussdiagramm mineralische Rohstoffe der Energieverteilung



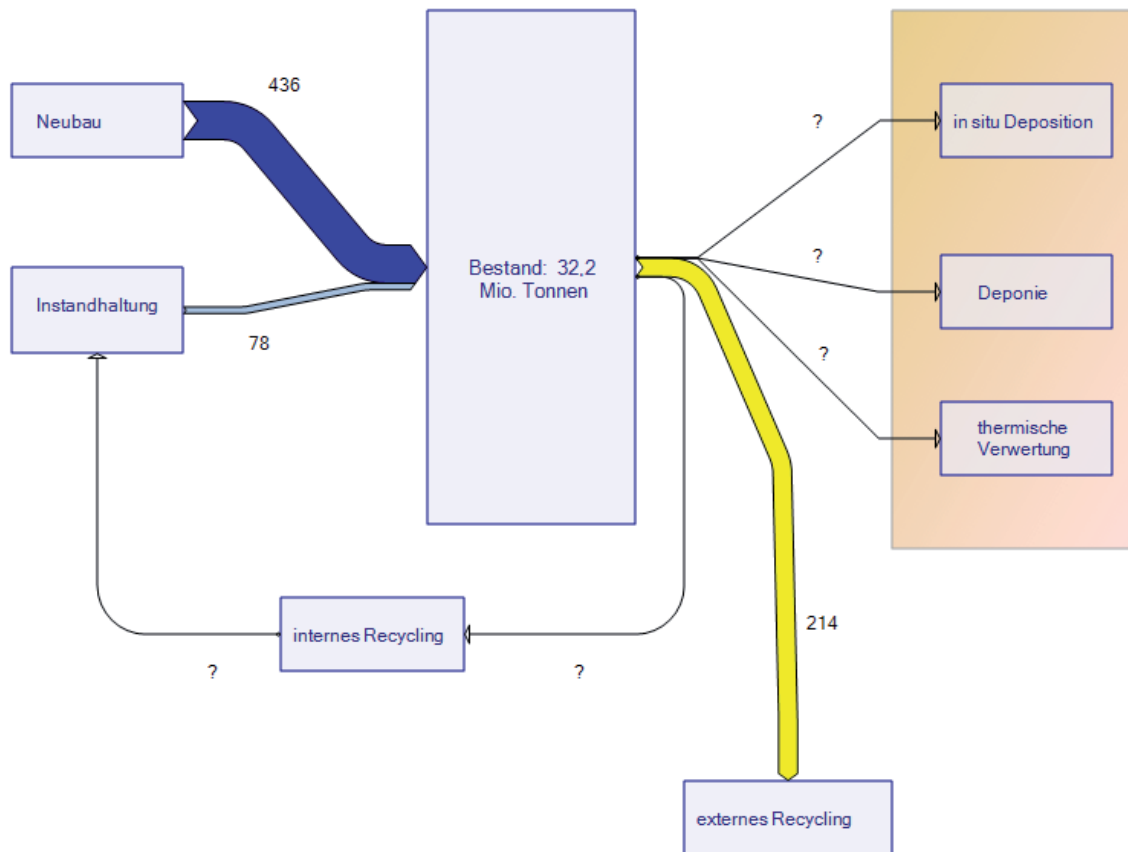
Quelle: Eigene Berechnung

Die metallischen Rohstoffe der Strom- und Gasnetze werden nach unserer Abschätzung nach ihrer Nutzung komplett recycelt. Der Grund liegt in der guten Separierung der einzelnen Bestandteile, die eine gute Erfassung der metallischen Rohstoffe bei der Erneuerung ermöglichen. Es spricht wenig dafür, dass Teilfraktionen dieser Rohre oder Kabel zusammen mit Bauschutt (wie im Hochbau) etc. deponiert werden.

Der höhere Abbruchanteil der metallischen Rohstoffe im Vergleich zu den Instandhaltungen erklärt sich aus dem Ersatz von alten Gasrohren aus Grauguss und duktilem Guss durch PE-Rohre im Mittel- und Niederdrucknetz der regionalen Versorgungsbe-triebe.

Abb. 26: Materialflussdiagramm metallische Rohstoffe der Energieverteilung

Flussdiagramm metallische Rohstoffe Energienetze (in 1000 t)

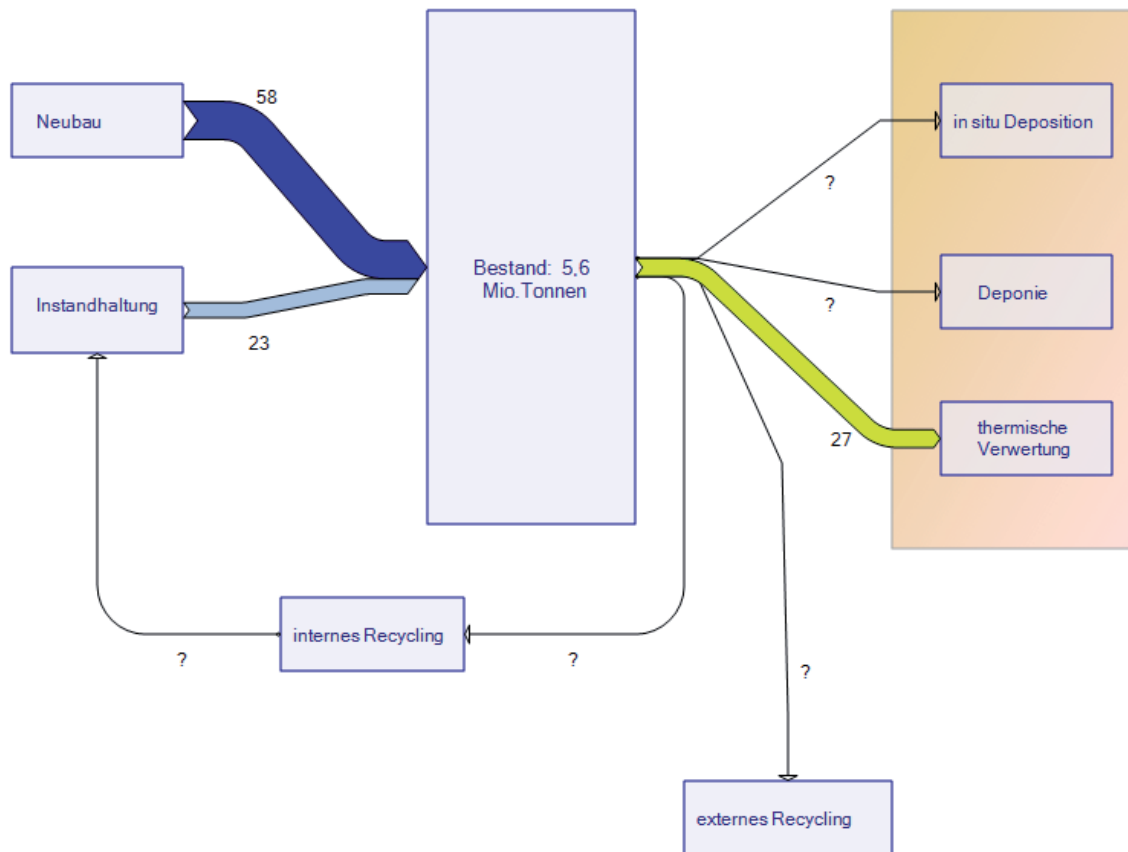


Quelle: Eigene Berechnungen

Die Kunststofffraktion bei Energienetzen besteht zumeist aus PE, in Form von Rohren und Folien bei Gasrohren, aber auch als Ummantelung von Kabeln. In der Abbruchmasse von Stromkabel sind zudem aus den älteren Kabeln Isolieröl und Haftmasse. Wir gehen bei den Kunststoffen und sonstigen Rohstoffen von einer thermischen Verwertung aus.

Abb. 27: Materialflussdiagramm Kunststoffe und sonstige Rohstoffe der Energieverteilung

Flussdiagramm Kunststoffe Energienetze (in 1000 t)



Quelle: Eigene Berechnungen

6.8 Energieerzeugung

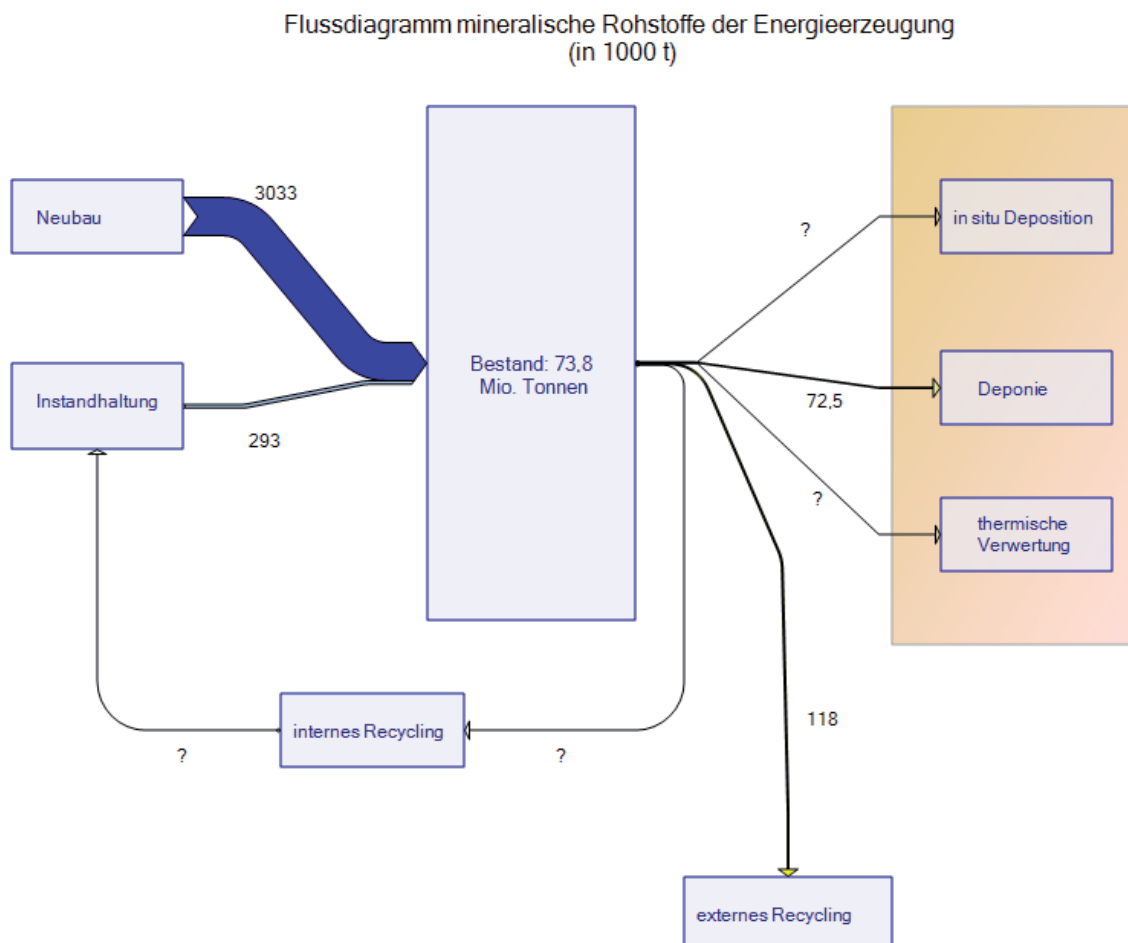
Für konventionelle Kraftwerke und Biogasanlagen sind die Materialaufwendungen für Erneuerung bzw. Instandhaltung über die technische Lebensdauer abgeschätzt, die nicht ohne weiteres mit reellen Instandhaltungsmaßnahmen übereinstimmen müssen. Grundsätzlich wäre mit Ausnahme der Wasserkraftwerke und dem Großteil der Gaskraftwerke zwar möglich, über die Altersstruktur der Kraftwerke, WEA und Biogasanlagen eine Dynamisierung des Anlagenbestandes zu modellieren und damit den Ersatz von Kraftwerken realistischer abzuschätzen. Dies war jedoch in diesem Projekt zeitlich nicht zu leisten. Als Annäherung werden daher die jährlichen Materialflüsse, die über die Abschreibung der technischen Lebensdauer ermittelt wurden, jeweils als Ersatzinvestitionen gewertet. Um logisch konsistent zu bleiben, müssen diesen jährlichen Materialflüssen für die Instandhaltung eine ähnlichen Menge an Abbruchmengen gegenüberstehen. Beton und Bewehrungsstahl, die üblicherweise in Gebäuden eingesetzt werden und bei der nur geringe Instandhaltungen in der Nutzungsphase angenommen

werden, sind nur mit 10 % ihrer Bestandsmenge in die Abschätzung des Instandhaltungsaufwandes übernommen worden.

Für WEA wird keine reguläre Instandhaltung abgeschätzt, allerdings fließen in die Instandhaltung die Materialflüsse der Repowering-Maßnahmen mit ein. In der Abbruchmenge sind wiederum die Ressourcen erfasst, die im Rahmen von Repowering durch den Abbau älter WEA anfallen. Für Wasserkraftanlagen werden keine Materialbedarfe für den Neubau abgeschätzt, da hierfür keine Daten vorliegen.

Da es sich zumeist um Gebäude mit entsprechender Maschinen- und Regelungstechnik handelt, werden die mineralischen Rohstoffe des Gebäudes wie normaler Bauschutt bewertet. Das heißt, wir gehen bei Abbruch bzw. Erneuerung alter Kraftwerke von einer Recyclingquote von 62 % aus, die restlichen 38 % der mineralischen Rohstoffe werden danach deponiert.

Abb. 28: Materialflussdiagramm mineralische Rohstoffe der Energieerzeugung

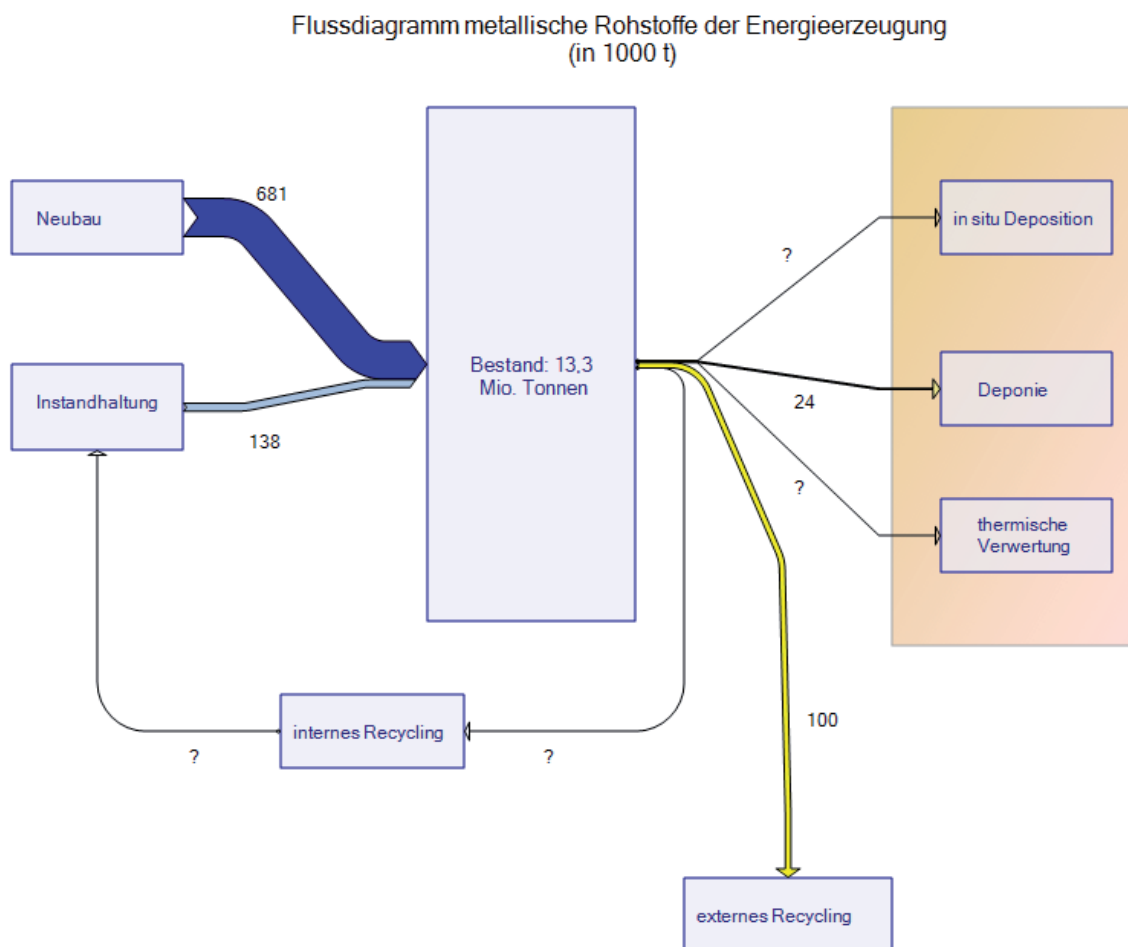


Quelle: Eigene Berechnungen

Für metallische Rohstoffe wird als Annahme getroffen, dass der Anteil des unlegierten bzw. niedriglegierten Stahls vor allem den Bewehrungsstahl der Gebäude umfasst. Bei

diesem gehen wir, wie Doka (2007), von einem Recyclinganteil von 70 % aus. Für die restlichen metallischen Rohstoffe wird vermutet, dass diese meist Bestandteil der Maschinen- und Steuerungstechnik darstellen und diese vor dem Rückbau eines Kraftwerks zuvor aus dem Gebäude entfernt werden. Damit ist grundsätzlich eine gute Erfassung dieser Metalle möglich, so dass wir von einer Recyclingquote von 90 % der restlichen Metalle ausgehen. Aus diesen Überlegungen heraus ergeben sich folgende Abbruchmengen metallischer Rohstoffe:

Abb. 29: Materialflussdiagramm metallische Rohstoffe der Energieerzeugung

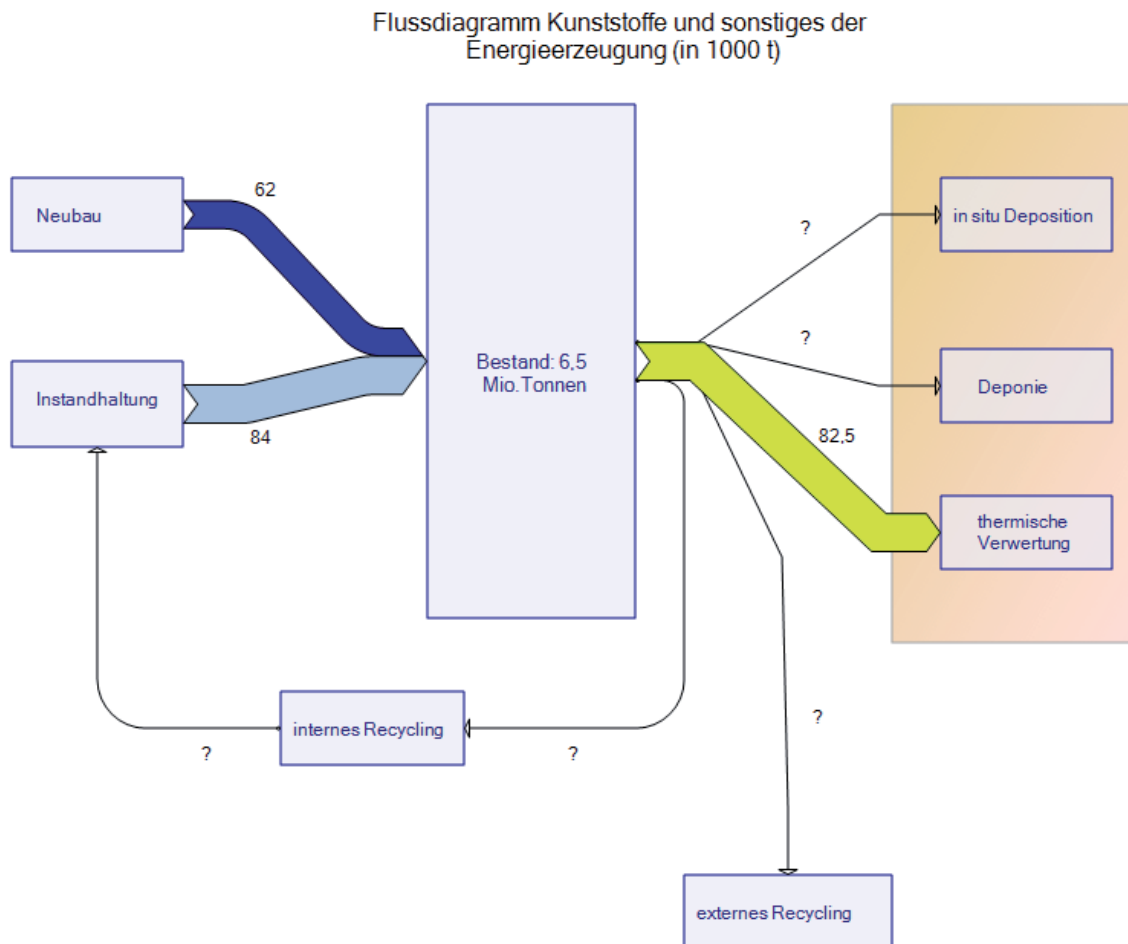


Quelle: Eigene Berechnungen

Die Kunststoffe und sonstigen Materialien im Bereich der Energieerzeugung umfassen vor allem Mineralwolle, PE und PVC. In geringeren Mengen sind in den Instandhaltungsflüssen auch noch Gummi, glasfaserverstärkter Kunststoff und eine nicht näher bestimmte Kategorie der sonstigen Materialien im Bereich der Wasserkraftanlagen enthalten. Es liegen keine Informationen über die Verwertungs- bzw. Behandlungswege dieser Stoffkategorien beim Rückbau von Energieerzeugungseinrichtungen vor. Wir

vermuten, dass diese Materialien vor allem thermisch verwertet werden und haben die Abbruchmengen der Kunststoffe und sonstigen Materialien entsprechend zugeordnet.

Abb. 30: Materialflussdiagramm Kunststoffe und sonstige Materialien der Energieerzeugung



Quelle: Eigene Berechnungen

7 Zusammenfassung und Handlungsempfehlungen

Die in diesem Projekt zusammengetragenen Ergebnisse zeigen, dass die Errichtung und Erhaltung von Infrastruktursystemen mit erheblichen Stoffströmen verbunden sind. Die erstellte Datenbasis der in Infrastrukturen gebundenen Materialspeicher und jährlich anfallenden Materialflüsse liefert die Grundlage, mit deren Hilfe gezielt Ansätze zur Ressourcenschonung abgeleitet und diskutiert werden können. Zudem liefern die Projektergebnisse Informationen, welche Materialien in welcher Menge bei einem Rückbau dieser Infrastrukturen potenziell als Recyclingmaterial zur Verfügung stehen würden. Sie können zudem dafür genutzt werden, die stoffliche Dimension bestimmter Ausbauziele (z.B. DENA-Netzstudien im Stromsektor) abzuschätzen.

Sowohl die Bestands- als auch die Flussgrößen wurden bis auf wenige Ausnahmen mittels eines bottom-up-Ansatzes erfasst, bei dem die Länge bzw. die Anzahl der einzelnen Referenzsysteme mit spezifischen Materialkoeffizienten verknüpft und auf den Gesamtbestand bzw. auf die jährliche Erweiterung / Erneuerung hochgerechnet wurden.

Für die einzelnen Infrastruktursysteme lagen Daten unterschiedlicher Güte und Detailtiefe vor. Während z.B. für die Schieneninfrastruktur oder Windenergieanlagen sehr genaue und ausführliche Materialdaten vorlagen, bis hin zum gespeicherten Bestand an Schmieröl oder Epoxidharz, lagen für andere Infrastrukturbereiche nur grundlegende Daten vor. So sind für Wasserkraftwerke nur Beton und die drei Massenmetalle Stahl, Kupfer und Aluminium explizit abgeschätzt. Für einzelne Infrastruktursysteme konnte zudem der Materialverbrauch, der mit dem Ausbau bzw. der Erneuerung dieser Systeme verbunden ist, aufgrund fehlender Daten nicht ermittelt werden (siehe Tab. 154). Die Unterschiede in der Qualität und Detailtiefe der Daten haben Auswirkung auf die Höhe des abgeschätzten Materialbestandes bzw. der jährlichen Materialflüsse und damit wiederum auf die Vergleichbarkeit der jeweiligen Infrastruktursysteme untereinander. Zusätzlich hat die Auswahl der Referenzsysteme, für die der Materialbestand abgeschätzt wurde, einen Einfluss auf die Ergebnisse. Während durch Schmied/Mottschall (2010) die Schieneninfrastruktur nahezu vollständig abgebildet werden konnte, war dies bei anderen Infrastruktursystemen nicht der Fall. So wurden z.B. für die Gasnetze bis auf pauschale Zuschläge für Regler und Schieber keine weiteren Einrichtungen der Netzinfrastuktur, wie Druckregelungsanlagen oder Leitstellen, mit in die Abschätzung einbezogen.

Die Materialbestände der deutschen **Straßeninfrastruktur** (über 7,3 Mrd. Tonnen) wurden über technische Straßenbaunormen, die den Aufbau verschiedener Straßenkategorien (Bundesautobahnen, Bundes-, Landes-, Kreis- und Gemeindestraßen) festlegen, für einen Quadratmeter Referenzstraße ermittelt und diese Werte auf der Basis von Referenzquerschnitten dann auf die bestehende Länge des deutschen Straßennetzes hochgerechnet. Die jährlichen Erneuerungsbedarfe wurden über die Nutzungs- bzw. Lebensdauer hochgerechnet. Die hier erfassten Materialmengen ergeben sich

allein aus der Betrachtung der Straßenflächen sowie der Ingenieurbauwerke an Bundesautobahnen. Andere Bereiche, die ebenfalls der Straßeninfrastruktur zugerechnet werden können, wie Fuß- und Radwege, Lärmschutzwände oder Schutzplanken waren nicht Teil der Analyse.

Der Materialbestand im Bereich der **Schieneninfrastruktur** (1,15 Mrd. Tonnen) konnte im Verlauf des Projektes dank der umfangreichen Daten eines parallel durchgeführten UBA-Projektes (Schmied/Mottschall 2010) sehr umfassend ermittelt werden. Die Hochschätzung der gespeicherten Materialmengen in der **Wasserstraßeninfrastruktur** (rund 190 Mio. Tonnen), einschließlich Umschlaganlagen, basiert im Wesentlichen auf früheren Untersuchungen von Stiller (1995) und Manstein/Stiller (2000), welche am Wuppertal Institut durchgeführt wurden.

Die gespeicherte Menge an mineralischen Rohstoffen in der Straßeninfrastruktur übersteigt die der anderen Infrastruktursysteme deutlich. Zudem sind die jährlichen Stoffflüsse im Bereich der Verkehrsinfrastrukturen - im Gegensatz zu den anderen Infrastruktursystemen - vor allem durch die Instandhaltung der Infrastruktur bestimmt. So ist der jährliche Materialbedarf für die Instandhaltung im Straßenbau (104 Mio. Tonnen) fünfmal höher als der des Neu- und Ausbaus (21 Mio. Tonnen). Dabei sind Gemeindestraßen sowohl beim Neubau als auch bei der Instandsetzung in absoluten Größen auf Grund der Länge des Straßennetzes der größte Verursacher von Stoffflüssen⁸⁹. Auch im Schienennetz geht der Großteil der jährlichen Stoffströme in die Instandhaltung der Strecken. Eine Erweiterung findet nur noch in geringem Maße statt.

Der Materialbestand bei Wasserstraßen ist mit rund 190 Mio. Tonnen ebenfalls hoch und wird wie die anderen Infrastrukturbereiche durch mineralische Baustoffe dominiert. Die Datensituation lässt eine belastbare Analyse der Materialströme zur Instandhaltung von Wasserstraßen nicht zu. Daher konnte nur der Materialbestand für den Neu- und Ausbau abgeschätzt werden⁹⁰.

Im Bereich der **Wasser- und Abwasserinfrastruktur** wurden folgenden Referenzsysteme identifiziert und untersucht:

- Infrastrukturen der Wasserversorgung:
Talsperren, Wasserwerke, Wasserspeicher, Leitungsnetz
- Infrastrukturen der Abwasserentsorgung:
Kanalnetz, Schächte, Regenentlastung, Kläranlagen

Bezüglich der in der Wasser- und Abwasserinfrastruktur gebundenen Materialien ist auch hier die herausragende Bedeutung der mineralischen Baustoffe hervorzuheben, welche knapp 99 % der insgesamt knapp 1,8 Mrd. Tonnen Baustoffe ausmachen. Dies liegt vorwiegend an der Rohrbettung der Leitungsnetze. Auch Beton (und hier vorwie-

⁸⁹ Pro Kilometer sind Autobahnen der ressourcenintensivste Straßentyp.

⁹⁰ Die Instandsetzung von z. B. Schleusen ist allerdings nur schwierig von einem Ausbau zu unterscheiden. Häufig wird bei einer Instandsetzung die Schleuse erweitert und ausgebaut.

gend Stahlbeton) spielt mit knapp 500 Mio. Tonnen bei der Konstruktion vieler Anlagen der Wasser- und Abwasserinfrastruktur eine große Rolle. Im Gegensatz dazu spielen Metalle (rund 20 Mio. Tonnen, davon überwiegend Stahl und Eisen) und Kunststoffe (< 2 Mio. Tonnen) nur eine untergeordnete Rolle. Als Hauptwerkstoffe im Leitungsbau sind sie zudem meist unterirdisch verbaut und damit schlecht zugänglich.

Die Veränderung des aktuellen Materialbestandes resultiert im Wesentlichen aus Neubau- / bzw. Rückbauaktivitäten und zu einem geringeren Maße aus unterschiedlichen Sanierungsverfahren.⁹¹ Jedoch konnten gerade die jährlichen Flüsse für Erneuerung und Instandhaltung häufig nicht belastbar ermittelt werden. Damit ist eine Vergleichbarkeit der ermittelten jährlichen Flüsse gerade mit anderen Infrastruktursystemen schwierig. Angesichts der lückenhaften Datengrundlagen sind die ermittelten jährlichen Materialflüsse mit etwa 1 % wahrscheinlich unterschätzt. Dies gilt insbesondere für durch Instandhaltung induzierte Materialflüsse. Durch den Einsatz neuer Materialien (verstärkte Verwendung von Kunststoff) liegt der Materialinput bei Erneuerungsaktivitäten teilweise sogar unter dem Material-Output. Bei der Interpretation der Ergebnisse ist zu berücksichtigen, dass eine Annäherung an tatsächliche Erneuerungsraten (statt erforderlicher Erneuerungsraten) die Grundlage für die Berechnungen stellt. Gerade im Bereich der Wasser- und Abwasserinfrastruktur wird der Investitionsbedarf in die Instandhaltung als sehr hoch eingeschätzt, was steigende jährliche Materialflüsse nach sich ziehen würde. Die Angaben über den Investitionsbedarf schwanken allerdings stark. Während Kluge et al. (2003) von 150 bis 250 Mrd. Euro sprechen, kommen Reidenbach et al. (2008) nur auf einen kommunalen Investitionsbedarf von 65 Mrd. Euro für Ersatzinvestitionen im Wasser- und Abwasserbereich.

Im Rahmen von MaRes wurden neun verschiedene Arten der **Stromerzeugung** untersucht.⁹² Nicht untersucht wurden zum einen Anlagen mit geringer Bedeutung für die deutsche Energieversorgung (z.B. geothermische Stromerzeugung) bzw. Energieerzeugungsarten, die häufig zunächst zur Eigenversorgung dienen (Photovoltaik). Im Bereich der Energieverteilungsinfrastruktur wurden die Daten für die Strom-, Gas- und Wärmenetze erfasst.

Die Materiallager der **Energieverteilungsnetze** (650 Mio. Tonnen) sind - bedingt durch die Sandbettung der Stromkabel und der Gas- und Fernwärmerohre - deutlich materialintensiver als die Erzeugungsinfrastruktur (88 Mio. Tonnen). Ohne den verbauten Sand (585 Mio. Tonnen) sind allerdings im Bestand der Energieerzeugungsinfrastrukturen höhere Mengen an Rohstoffen gespeichert. Wie auch im Bereich der Wasser- und Abwasserinfrastruktur bestimmen neben Sand vor allem Beton (94 Mio. Tonnen) und Stahl (37 Mio. Tonnen) die Materialbestände der Energieinfrastrukturen.

⁹¹ In der Sanierung unterscheiden wir Reparatur, Instandhaltung und Erneuerung.

⁹² Dies sind konventionelle Kraftwerke (Stein- und Braunkohle), Gaskraftwerke, Kernkraftwerke, und im Bereich der erneuerbaren Energiequellen Wasserkraft- und Windenergieanlagen (on-shore) sowie Biogasanlagen. Zusätzlich wurden noch Heizkraftwerke und Blockheizkraftwerke abgeschätzt.

Konventionelle Kraftwerke sind in ihrer Mehrzahl am Ende ihrer Lebensdauer angelangt und müssen entweder ausgetauscht oder durch andere **Energieerzeugungssysteme** ersetzt werden – z.B. dezentral auf Grundlage erneuerbarer Energiequellen. Damit sind relevante Ressourcenaufwendungen verbunden. Unsere Analysen zeigen, dass auch dezentrale Einrichtungen mit hohen Stoffströmen für die Erstellung der Anlagen verbunden sind. Allerdings wird dies bspw. bei Windenergieanlagen in der Nutzungsphase mehr als kompensiert, da bis auf notwendige Instandsetzungen nur geringe Stoffströme induziert werden und pro kWh erzeugter Energie deutlich weniger Ressourcen beansprucht werden als bei fossilen Kraftwerken.

Mit dem Ausbau dezentraler Energieerzeugungsanlagen und einer regionalen Verschiebung des Angebots (Offshore Windenergie im Norden Deutschlands) muss mit verstärkten Investitionen für den Leitungsbau auf allen Spannungsebenen gerechnet werden. Insgesamt sind die jährlichen Materialströme im Bereich der Energienetze und der regenerativen Energieerzeugungseinrichtungen noch deutlich mehr durch Ausbau und Erweiterung als durch Erneuerung und Instandhaltung geprägt.

Der Materialbestand der drei Infrastruktursysteme ergibt nach unseren Abschätzungen zusammen einen Wert von 11,13 Mrd. Tonnen. Zu fast 99 % werden diese Bestandsmengen durch mineralische Rohstoffe bestimmt. Der größte Teil der mineralischen Rohstoffe besteht aus Sand und Kies, der zum einen als Unterschicht in der Verkehrsinfrastruktur genutzt wird, zum anderen als Kabel- und Rohrbettung in der Wasser-/Abwasserinfrastruktur sowie bei den Energienetzen verwendet wird. Die Hälfte des Betonbestandes ist in den Infrastrukturen der Abwasser- und Wasserwirtschaft gebunden.

Tab. 157: Übersicht über den Materialbestand an mineralischen Rohstoffen

in 1.000 t	Beton	Sand, Kies, Splitt	Schotter	Zement	sonstige min. Bau- stoffe	Summe
Verkehrsinfrastruktur	262.959	7.184.286	953.750		185.106	8.586.101
Straßeninfrastruktur		6.484.083	639.814		102.383	7.226.281
Ingenieurbauwerke Bundesfernstraßen	57.191					57.191
Schieneninfrastruktur	137.565	670.515	313.935		99	1.122.114
Wasserstraßen	68.203	29.688			82.624	180.515
Wasser- und Abwasserinfrastruktur	475.512	1.163.003		6.147	95.413	1.740.075
Wasserinfrastruktur	148.747	424.535		688	57.203	631.173
Abwasserinfrastruktur	326.765	738.468		5.459	38.210	1.108.902
Energieinfrastruktur	93.682	589.952		1.492	823	685.949
Energienetze	25.628	584.988		1.427	112	612.154
Energieerzeugung	68.054	4.964		65	711	73.794
Summe	832.153	8.937.241	953.750	7.639	281.342	11.012.124

Quelle: Eigene Berechnung

Rund 100 Mio. Tonnen metallische Rohstoffe sind nach unseren Berechnungen in den drei Infrastruktursystemen gespeichert. Der überwiegende Teil davon besteht aus Stahl und Eisen mit fast 92 Mio. Tonnen. Metallische Rohstoffe sind vor allem in der Schieneninfrastruktur und den Energienetzen gespeichert. Wesentliche Mengen von über 10 Mio. Tonnen sind zudem jeweils in der Wasserinfrastruktur und in den Anlagen der Energieerzeugung zu finden.

Tab. 158: Übersicht über den Materialbestand an metallischen Rohstoffen

in 1.000 t	Stahl/Eisen	Kupfer	Aluminium	andere Metalle	Summe
Verkehrsinfrastruktur	33.003	436	134	46	33.619
Straßeninfrastruktur					0
Ingenieurbauwerke Bundesfernstraßen	4.380				4.380
Schieneninfrastruktur	20.848	436	134	46	21.464
Wasserstraßen	7.775				7.775
Wasser- und Abwasserinfrastruktur	20.077	93	18	13	20.201
Wasserinfrastruktur	11.996	12		13	12.021
Abwasserinfrastruktur	8.081	81	18		8.180
Energieinfrastruktur	38.733	3.637	2.026	1.172	45.568
Energienetze	25.891	3.408	1.817	1.124	32.240
Energieerzeugung	12.842	229	209	48	13.328
Summe	91.813	4.166	2.178	1.231	99.388

Quelle: Eigene Berechnung

Die Energieerzeugung und Energienetze sind über die hohen Bestände an Dämmmaterial, PE-Rohren und glasfaserverstärkter Kunststoff (GFK) die mit Abstand größten Materiallager im Bereich der Kunststoffe und sonstige Materialien. Die Verkehrsinfrastruktur, in Form der Schieneninfrastruktur, ist vor allem über den Bestand an Holzschwellen im Gesamtbestand der „Kunststoffe und sonstigen Materialien“ vertreten.

Tab. 159: Übersicht über den Materialbestand an Kunststoffen und sonstigen Materialien

in 1000 t	Kunststoffe	Dämm-Mat.	Holz	Sonstiges	Summe
Verkehrsinfrastruktur	2.282	0	2.979	273	5.534
Straßeninfrastruktur					0
Ingenieurbauwerke Bundesfernstraßen					0
Schieneninfrastruktur	398		2.979	273	3.650
Wasserstraßen	1.884				1.884
Wasser- und Abwasserinfrastruktur	1.654	0	0	0	1.654
Wasserinfrastruktur	934				934
Abwasserinfrastruktur	720				720
Energieinfrastruktur	3.818	548	725	7.033	12.124
Energienetze	3.670	326	725	914	5.634
Energieerzeugung	148	222		6.119	6.489
Summe	7.755	548	3.704	7.305	19.312

Quelle: Eigene Berechnungen

Neben den Verkehrsinfrastrukturen, die über ihre Unterbauten hohe Bestände an mineralischen Rohstoffe binden, sind im Bestand vor allem die Netzinfrastrukturen von Bedeutung, deren Netze im Erdreich und damit im überwiegenden Teil in Sandbettung verlegt sind. Diese Sandmengen können und werden aber gut im Kreislauf geführt, so dass an dieser Stelle meist nur ein Bedarf durch Neubau entsteht.

Tab. 160: Übersicht über den jährlichen Materialbedarf an mineralischen Rohstoffen für den Neu- und Ausbau

in 1.000 t	Beton	Sand, Kies, Splitt	Schotter	Zement	sonstige min. Bau- stoffe	Summe
Verkehrsinfrastruktur	3.684	21.379	4.685	0	428	30.177
Straßeninfrastruktur		18.958	1.846		418	21.222
Ingenieurbauwerke Bundesfernstr.	1.145					1.145
Schieneninfrastruktur	1.461	1.936	2.840		1	6.238
Wasserstraßen	1.079	485			9	1.573
Wasser- und Abwasserinfrastruktur	3.275	12.974	0	14	471	16.738
Wasserinfrastruktur	73	1.525		5	144	1.747
Abwasserinfrastruktur	3.202	11.449		9	327	14.991
Energieinfrastruktur	3.017	15.768	0	8	28	18.822
Energienetze	172	15.606			11	15.788
Energieerzeugung	2.846	163		8	17	3.033
Summe	9.977	50.122	4.685	22	928	65.735

Quelle: Eigene Berechnungen

Für den Neubau von Infrastrukturen werden nach unserer Berechnung pro Jahr ca. 66 Mio. Tonnen mineralischer Rohstoffe benötigt, davon rund die Hälfte in der Verkehrsinfrastruktur. Wie im Bestand ist der jährliche Verbrauch an mineralischen Rohstoffen vor allem durch Sand, Kies und Splitt (75 % der Gesamtmenge) bestimmt.

Tab. 161: Übersicht über den jährlichen Materialbedarf an metallischen Rohstoffen für Neu- und Ausbau

in 1.000 t	Stahl/Eisen	Kupfer	Aluminium	andere Metalle	Summe
Verkehrsinfrastruktur	315	5	2	1	322
Straßeninfrastruktur					0
Ingenieurbauwerke Bundesfernstr.	89				89
Schieneninfrastruktur	163	5	2	1	170
Wasserstraßen	63				63
Wasser- und Abwasserinfrastruktur	67	0	0	0	67
Wasserinfrastruktur	24				24
Abwasserinfrastruktur	43				43
Energieinfrastruktur	1.027	44	42	3	1.116
Energienetze	377	29	30	0	436
Energieerzeugung	650	15	12	3	681
Summe	1.409	48	44	4	1.505

Quelle: Eigene Berechnung

Für den Ausbau der Netze werden pro Jahr ca. 1,5 Mio. Tonnen metallischer Rohstoffe benötigt. Der Großteil dieser Metalle wird zum Ausbau der Energienetze aber vor allem der Energieerzeugungseinrichtungen benötigt. Rund die Hälfte der 681.000 Tonnen an metallischen Rohstoffen für den Aus- und Neubau von Anlagen der Energieerzeugung ist unseren Berechnungen nach dem jährlichen Zuwachs von Windenergieanlagen zuzuschreiben.

Tab. 162: Übersicht über den jährlichen Materialbedarf an Kunststoffen und sonstigen Rohstoffen für den Neu- und Ausbau

in 1.000 t	Kunststoffe	Dämm-Mat.	Holz	Sonstiges	Summe
Verkehrsinfrastruktur	4	0	0	0	4
Straßeninfrastruktur					0
Ingenieurbauwerke Bundesfernstr.					0
Schieneninfrastruktur	4		0	0	4
Wasserstraßen					0
Wasser- und Abwasserinfrastruktur	75	0	0	0	75
Wasserinfrastruktur	5				5
Abwasserinfrastruktur	70				70
Energieinfrastruktur	65	12	0	43	120
Energienetze	58	0			58
Energieerzeugung	7	12		43	62
Summe	144	12	0	43	199

Quelle: Eigene Berechnung

Der jährliche Bedarf an Kunststoffen und sonstigen Materialien ist mit 200.000 Tonnen vergleichsweise gering. Er wird vor allem durch den Ausbau der Gas- und Abwassernetze mit PE-Rohren und den Bedarf an glasfaserverstärkter Kunststoff für die Rotoren der neu errichteten Windenergieanlagen bestimmt.

Während die Datenqualität der Materialbestände und der jährlichen Mengen für den Aus- und Neubau zum großen Teil als recht gut eingeschätzt wird, sind die Unsicherheiten bei der Abschätzung der jährlichen Materialmengen für die Instandhaltung als deutlich höher einzustufen. Ein Vergleich der einzelnen Infrastruktursysteme ist mit den genannten Einschränkungen der Datenqualität und Berechnungsmethoden vorzunehmen.

Nach unseren Berechnungen sind pro Jahr rund 148 Mio. Tonnen an mineralischen Rohstoffen notwendig, um die drei Infrastruktursysteme instand zu halten. Die größte Menge ergibt sich aus der Instandhaltung der Straßeninfrastruktur, die fast vollständig die jährlichen Materialmengen für Instandhaltung verursachen. Allerdings werden dafür im hohen Maße RC-Baustoffe verwendet.

Tab. 163: Übersicht über den jährlichen Materialbedarf an mineralischen Rohstoffen für die Instandhaltung

in 1.000 t	Beton	Sand, Kies, Splitt	Schotter	Zement	sonstige min. Bau- stoffe	Summe
Verkehrsinfrastruktur	3.513	109.857	28.813	0	3.149	145.331
Straßeninfrastruktur		97.462	3.198		3.149	103.809
Ingenieurbauwerke Bundesfernstr.	964					964
Schieneninfrastruktur	2.517	12.395	25.614		0	40.526
Wasserstraßen	32					32
Wasser- und Abwasserinfrastruktur	561	0	0	34	77	672
Wasserinfrastruktur				32		32
Abwasserinfrastruktur	561			2	77	640
Energieinfrastruktur	203	1.829	0	0	6	2.038
Energienetze	42	1.816			1	1.859
Energieerzeugung	162	12		0	5	179
Summe	4.277	111.686	28.813	34	3.232	148.042

Quelle: Eigene Berechnung

Metallische Rohstoffe für die Instandhaltung fallen vor allem in der Schieneninfrastruktur und den Anlagen der Energieerzeugungseinrichtungen an. Dort werden über die Abschreibung der technischen Lebensdauer hohe Instandhaltungsbedarfe für Schienen und Kraftwerksgebäude mit ihrem Bewehrungsstahl unterstellt.

Tab. 164: Übersicht über den jährlichen Materialbedarf an metallischen Rohstoffen für die Instandhaltung

in 1.000 t	Stahl/Eisen	Kupfer	Aluminium	andere Metalle	Summe
Verkehrsinfrastruktur	690	20	2	5	717
Straßeninfrastruktur					0
Ingenieurbauwerke Bundesfernstr.	81				81
Schieneninfrastruktur	610	20	2	5	636
Wasserstraßen					0
Wasser- und Abwasserinfrastruktur	72	0	0	0	72
Wasserinfrastruktur	66				66
Abwasserinfrastruktur	6				6
Energieinfrastruktur	145	28	21	1	195
Energienetze	35	25	18		78
Energieerzeugung	111	3	2	1	118
Summe	908	48	23	6	984

Quelle: Eigene Berechnung

Tab. 165: Übersicht über den jährlichen Materialbedarf an Kunststoffen und sonstigen Rohstoffen für die Instandhaltung

in 1.000 t	Kunststoffe	Dämm-Mat.	Holz	Sonstiges	Summe
Verkehrsinfrastruktur	15	0	99	9	123
Straßeninfrastruktur					0
Ingenieurbauwerke Bundesfernstr.					0
Schieneninfrastruktur	15		99	9	123
Wasserstraßen					0
Wasser- und Abwasserinfrastruktur	51	0	0	0	51
Wasserinfrastruktur	12				12
Abwasserinfrastruktur	39				39
Energieinfrastruktur	28	6	0	72	105
Energienetze	23	0			23
Energieerzeugung	5	6		72	82
Summe	94	6	99	81	279

Quelle: Eigene Berechnung

Der Materialbedarf für Kunststoff und sonstige Materialien aus der Instandhaltung (Tab. 165) ist höher als für den Neubau (Tab. 162). Die Differenz erklärt sich aus dem Bedarf von fast 100.000 Tonnen Holz in der Schieneninfrastruktur.

Um die Größenordnungen der jährlichen Materialbedarfe besser einschätzen zu können, sind in Tab. 165 für Stahl, Kupfer und Aluminium sowie für mineralische Rohstoffe die jährlichen Produktionsmengen (mineralische Rohstoffe) bzw. Gesamtverbräuche (Metalle) den Anteilen des Verbrauchs der drei Infrastruktursysteme an diesen Gesamtmengen gegenübergestellt worden.

Für die Gegenüberstellung wurde als Annahme getroffen, dass die Produktionsmengen der mineralische Rohstoffe zu je 50 % in den Tief- und Hochbau gehen und umfassen damit 50 % der Gesamtproduktion der Branche Kies/Sand und Naturstein im Jahr 2008 (MIRO 2009). Die Zahlen zum Gesamtverbrauch an Metallen stammen von der BGR (2007) und beziehen sich auf das Jahr 2006.

Tab. 166: Anteil des jährlichen Materialbedarfs der drei Infrastruktursysteme am Gesamtverbrauch bzw. –produktion an ausgewählten Rohstoffen

	Eisen und Stahl	Kupfer	Aluminium	Mineralische Rohstoffe
	in 1.000 t	in 1.000 t	in 1.000 t	in 1.000 t
Gesamtproduktion bzw. Gesamtverbrauch	38.400	1.398	3.384	478.000
jährlicher Materialbedarf Infrastruktursysteme	1.519	95	69	183.647
Anteil in %	4,0 %	6,8 %	2,0 %	38,4 %

Quelle: Mineralische Rohstoffe: (MIRO 2009), Metallische Rohstoffe: BGR (2007).

Der jährliche Materialbedarf der drei Infrastruktursysteme an mineralischen Rohstoffen umfasst nur die Kategorien „Sand/Kies/Splitt“ und „Schotter“, da die restlichen mineralischen Rohstoffe verarbeitete Güter darstellen. Während der Anteil der drei Infrastruktursysteme am jährlichen Verbrauch von metallischen Rohstoffen in Deutschland im 1-promille Bereich liegt, ist der Anteil bei mineralischen Rohstoffen sehr hoch. Allerdings muss der Anteil an mineralischen Rohstoffen, die als Sekundärmaterial im Straßenbau zum Einsatz kommen, realistischerweise abgerechnet werden. Der genaue Umfang der RC-Baustoffe am jährlichen Materialbedarf mineralischer Rohstoffe im Straßenbau ist aber nicht bekannt.

Handlungsempfehlungen

Ein zunehmendes Materiallager in Infrastrukturen hat generell wachsende stoffliche und finanzielle Aufwendungen für die Instandhaltung und Erneuerung zur Folge. Deshalb sollte ein weiterer Aus- und Neubau grundsätzlich hinterfragt werden. Eine Begrenzung des Umfangs der Infrastruktursysteme ist eine notwendige Voraussetzung, sowohl stetig wachsende Unterhaltungskosten in den Griff zu bekommen, als auch zunehmenden Verbrauch natürlicher Ressourcen zu begrenzen.

Im Straßenbau könnte eine Überprüfung der Baunormen in Zusammenarbeit mit Straßenbauingenieuren und anderen Experten (z.B. Straßensicherheit) enorme Einsparpotentiale an mineralischen Rohstoffen ergeben (z.B. wäre eine Reduzierung der Straßenbreite bei Neubauprojekten und Sanierungen denkbar). Generell sollten Ressourcenaspekte in Investitionsentscheidungen von Infrastrukturen integriert werden und möglichst ressourcenschonende Technologien eingesetzt werden.

Soweit technisch möglich und ökotoxikologisch unbedenklich sollte für notwendige Instandhaltungs- und Ausbauarbeiten Recyclingmaterial verwendet werden. Auch bei der Sanierung von Infrastrukturen am Ende ihrer Lebensdauer (z.B. Brücken und Tunnel) sollten Verfahren mit einer möglichst geringen Ressourcenintensität eingesetzt

werden. Für den Rückbau von Infrastrukturen ist – soweit ökotoxikologisch und strahlungstechnisch unbedenklich – ein größtmöglicher Anteil an Recycling anzustreben.

Für leitungsgebundene Infrastrukturen empfiehlt sich ein proaktives Flächenmanagement unter Nutzung der Bebauungsreserven im Bestand (Brachflächen, Baulücken, leer stehende und unterausgelastete Flächen), um den weiteren Ausbau der Leitungslängen zu vermeiden oder zu verringern. Bei Stadtumbauprozessen sollte der Erhalt oder eine Erhöhung der baulichen Dichte angestrebt werden, da die Effizienz von technischen Infrastrukturen zumindest im Wasser- und Abwasserbereich direkt davon abhängig ist. Daraus folgt, dass eine sinnvolle Rückbaustrategie von den Netzen her einem dispersen Rückbau vorzuziehen ist.

Aufbauend auf den Erfahrungen im Projekt konzentriert sich der weitere Forschungsbedarf auf die Verbesserung der Datenbasis. Ein Teil der Hochrechnungen beruht auf Schätzungen, andere Infrastrukturbereiche mussten gänzlich unberücksichtigt bleiben, da entsprechende Daten nicht vorhanden oder öffentlich nicht zugänglich sind. Die Aufzeichnung von Lage und Typ (inkl. Materialgehalt) erdverlegter Leitungen in kommunalen Katastern sowie eine material- und ortsspezifische Inventarisierung und regelmäßige Fortschreibung des Materialbestands von Unternehmen der Verkehrs-, Wasser- und Energiewirtschaft würde in Zukunft eine genauere Abschätzung der stofflichen Bestände und Flüsse erlauben (insbesondere im Hinblick auf ihre spätere Verwertbarkeit). Desgleichen wäre anzustreben, dass die Netzentur berechtigt ist, in Abstimmung mit den Netzbetreibern, die vorhandenen Daten anonymisiert zur Verfügung zu stellen und so für wissenschaftliche und statistische Zwecke nutzbar zu machen. Insbesondere die jährlichen Materialflüsse für die Erneuerung und Instandhaltung von Infrastrukturen bedürfen einer genaueren Quantifizierung. Sinnvoll wäre daher bspw. die Zusammenarbeit mit Versorgungsunternehmen, um die Daten für ihr spezifisches Versorgungsgebiet (ländlich, städtisch) genauer zu erfassen und die in dieser Studie getroffenen Annahmen empirisch zu überprüfen.

Für eine mögliche Reduzierung des Instandhaltungsaufwandes wäre mittels Ökobilanzierung/Materialintensitätsanalyse zu überprüfen, inwieweit alternative Konstruktionsweisen (z.B. Betondeckschichten statt Asphaltdeckschicht im Straßenbau) den Instandhaltungsbedarf reduzieren können und lebenszyklusweit besser abschneiden.

Um die künftig zu erwartenden Mengen für Neubau und Instandhaltung einerseits und Bauabfälle und Bauabbruch andererseits prognostizieren zu können, ist eine dynamische Modellierung der Materialflüsse erforderlich. Dazu wären weitere Analysen zur Altersstruktur der deutschen Infrastruktursysteme notwendig. Auch sollte mit hinreichender Flächendeckung untersucht werden, inwieweit Infrastrukturen bereits zurückgebaut werden, inwieweit Altsysteme aus dem Erdreich entfernt werden und welche Veränderungspotenziale hier zu erwarten sind.

Auf der Grundlage des vorliegenden Inventars der Materiallager in den wesentlichen Infrastruktursystemen sollte eine weitere Entwicklung von Informations- und Managementsystemen für ein potentiell „Urban Mining“ erfolgen, um so einen optimierten Einsatz von Sekundärmaterial aus und im Hoch- und Tiefbau zu ermöglichen.

8 Literatur

Verkehrsnetze

Adler, W. (2004): Berichtsmodul Verkehr und Umwelt: Band 14 der Schriftenreihe Beiträge zu den Umweltökonomischen Gesamtrechnungen, Kurzfassung. Wiesbaden: Statistisches Bundesamt.

Arbeitsgemeinschaft Kreislaufwirtschaftsträger Bau (ARGE KWTB) (2007): 5. Monitoring-Bericht Bauabfälle (Erhebung 2004). http://www.arge-kwtb.de/Downloads/Monitoring-Bericht-KWTB_5.pdf (27.01.2011)

Bahn TV (2008): <http://www.bahntv-online.de/btvo/site/index.php?s=3800&ids=141640>; (20.05.08).

Buchert, M. / Fritsche, U. R. / Jenseit, W. / Rausch, L. / Deilmann, C. / Schiller, G. / Siedentop, S. / Lipkow, A. (2004): Nachhaltiges Bauen und Wohnen in Deutschland: Stoffflussbezogene Bausteine für ein nationales Konzept der nachhaltigen Entwicklung – Verknüpfung des Bereiches Bauen und Wohnen mit dem komplementären Bereich „öffentliche Infrastruktur“. UBA-FB 000543. Berlin: Umweltbundesamt.

Bundesanstalt für Straßenwesen (2009): Sicherheit geht vor – Straßentunnel in Deutschland. Herausgeber BMVBS und BAST.

Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung (BMVBS) (2009a): Verkehrsinvestitionsbericht 2008. Bundesdrucksache 16/11850.

Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung (BMVBS) (2009b): http://www.bmvbs.de/DE/VerkehrUndMobilitaet/Verkehrstraeger/Strasse/SicherheitVonBruecken/sicherheit-von-bruecken_node.html (27.01.2011).

Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung (BMVBS) (2008a): Längenstatistik der Straßen des überörtlichen Verkehrs. http://www.lbm.rlp.de/Dokumente/pdf/DOKU_700_00048.pdf

Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung (BMVBS) (2008b): Verkehr in Zahlen 2008/2009. Hamburg: Deutscher Verkehrs- Verlag GmbH.

Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung (BMVBS) (2008c): Wasserstraßen als Verkehrswege. <http://www.bmvbs.de/Verkehr/Wasser-,1466.912502/Wasserstrassen-als-Verkehrsweg.htm>

Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung (BMVBS) (2008d): Straßenbaubericht 2008; Bonn: BMVBS.

Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung (BMVBS) (2008e): Wasserstraßen als Verkehrswege; <http://www.bmvbs.de/Verkehr/1466/Wasser.htm> (07.07.2008).

Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung (BMVBS) (2008f): Übersichtskarte Bundeswasserstraßen. <http://www.bmvbs.de/cae/servlet/contentblob/35212/publicationFile/10771/uebersichtskarte-bundeswasserstrassen.pdf>

Bundesministerium für Verkehr, Bau- und Stadtentwicklung (BMVBS) (2007): Bundeswasserstraßen. Investitionen 2000; http://www.bmvbs.bund.de/SharedDocs/DE/Bilder/edit2_238.html?nn=36138

- Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung (BMVBS) (2006): Bericht über die Qualität, Dauerhaftigkeit und Sicherheit von Spannbetonbrücken; Bonn: BMVBS.
- Bundesministerium für Verkehr, Bau und Wohnungswesen BMV (2005): Verkehr in Zahlen 2005/2006. Hamburg: Deutscher Verkehrs-Verlag GmbH.
- Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU) (2006): Wasserwirtschaft in Deutschland; Teil 1: Grundlagen; Berlin.
- Corbat Holding SA (2008): Geschichte und Entwicklung der Holzschwelle; <http://www.corbat-holding.ch/documents/showFile.asp?ID=1420> (20.05.08).
- DB Netz AG (2007): Geschäftsbericht 2007; Berlin.
- Der Elsner – Handbuch für Straßen- und Verkehrswesen (vers. Jahrgänge). Otto Elsner.
- Els, W. (2009): Neubau der Kaiserschleuse in Bremerhaven. Vortrag auf dem 15. Darmstädter Geotechnik-Kolloquium an der TU Darmstadt, 13.3.2008. In BauPortal 6/2009.
- Erdmann, L. / Handke, V. / Klinski, S. / Behrendt, S. / Scharp, M. (2004): Nachhaltige Bestandsbewirtschaftung nicht erneuerbarer knapper Ressourcen. Handlungsoptionen und Steuerungsinstrumente am Beispiel von Kupfer und Blei. Werkstattbericht Nr. 68. Berlin: IZT – Institut für Zukunftsstudien und Technologiebewertung.
- Fendrich, L. (2007) (Hrsg.): Handbuch Eisenbahninfrastruktur; Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg.
- Fiedler, J. (2005): Bahnwesen; 5. Auflage; Werner-Verlag, 2005.
- Fockenberger, K. / Blaasch, G. / Sinnhuber, V. (2005): Bau der Schleuse Uelzen II am Elbe-Seiten-Kanal. In: Tiefbau 1/2005, 4-12
- Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, Arbeitsgruppe „Mineralstoffe im Straßenbau“ (2004): Technische Lieferbedingungen für Baustoffe und Böden zur Herstellung von Schichten ohne Bindemittel im Straßenbau. Ausgabe 2004. FGSV 697. Köln: FGSV Verlag.
- Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, Arbeitsgruppe „Sonderaufgaben“ (2002): Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen und Richtlinien für Tragschichten im Straßenbau. Ausgabe 1995/Fassung 2002. FGSV 999. Köln: FGSV Verlag.
- Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, Arbeitsgruppe „Asphaltstraßen“ (2001): Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen und Richtlinien für den Bau von Fahrbahndecken aus Asphalt. Ausgabe 2001. FGSV 799. Köln: FGSV Verlag.
- Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, Arbeitsgruppe „Fahrzeug und Fahrbahn“ (2001): Richtlinien für die Standardisierung des Oberbaues von Verkehrsflächen; Ausgabe 2001; FGSV 499; Köln: FGSV Verlag.
- Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, Arbeitsgruppe „Straßenentwurf“ (1996): Richtlinien für die Anlage von Straßen – Teil: Querschnitte. (RAS-Q) Ausgabe 1996. FGSV 295. Köln: FGSV Verlag.
- Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, Arbeitsgruppe „Mineralstoffe im Straßenbau“ (1994): TL Min-StB 2000; Technische Lieferbedingungen für Mineralstoffe im Straßenbau; Köln: FGSV-Verlag.

- Frischknecht, R. / Bollens, U. / Bosshart, S. / Ciot, M. / Ciseri, L. / Doka, G. / Hischer, R. / Martin, A. / Dones, R. / Ganter, U. (1996): Ökoinventare von Energiesystemen: Grundlagen für den ökologischen Vergleich von Energiesystemen und den Einbezug von Energiesystemen in Ökobilanzen für die Schweiz.
- Köser, H. / Herbst, G. / Konitzer, E. / Rozycki, C. v. (2002): Ökobilanzierung von Schienenverkehrssystemen am Beispiel des ICE-Verkehrs. Phase 1, Teil 1 (Datenerhebung). Abschlussbericht der Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg im Auftrag der Deutschen Bahn AG. Halle: 2002.
- Leuenberger, C. / Spittel, U. (2001): Luftreinhaltung bei Baustellentransporten.
- Lünser, H. (1999) Ökobilanzen im Brückenbau. Eine Umweltbezogene, ganzheitliche Bewertung. (Basel, Bosten, Berlin: Birkhäuser).
- Maibach, M. / Peter, D. / Seiler, B. (1999): Ökoinventar Transport: Grundlagen für den ökologischen Vergleich von Transportsystemen und den Einbezug von Transportsystemen in Ökobilanzen. Technischer Schlussbericht. INFRAS, Zürich.
- Manstein, C. /Stiller, H. (2000): Anwendung der Materialintensitätsanalyse nach dem MIPS-Konzept auf österreichische Verkehrsträgersysteme. Studie des Vereins Faktor4+ im Auftrag des österreichischen Ministeriums für Wissenschaft und Verkehr, Klagenfurt.
- Neubauamt Hannover (2010a): Neubau der Schleuse Bolzum. http://www.nba-hanno-ver.wsv.de/baumassnahmen/aktuelle_baumassnahmen/neubau_schleuse_minden/index.html
- Neubauamt Hannover (2010b): Neubau der Schleuse Dörverden. http://www.nba-hanno-ver.wsv.de/baumassnahmen/aktuelle_baumassnahmen/neubau_schleuse_doerverden/index.html
- Neubauamt Hannover (2010c): Neubau der Schleuse Minden. http://www.nba-hanno-ver.wsv.de/baumassnahmen/aktuelle_baumassnahmen/neubau_schleuse_minden/index.html
- Pogalens, D. / Lenz, E.-U. (2008): Sicherung und Ausbau des Seitenkanals Ladenburg am Neckar. In: Tiefbau 9/2008, 518-523.
- Reidenbach, M. / Bracher, T. / Grabow, B. / Schneider, S. / Seidel-Schulze, A. (2008): Investitionsrückstand und Investitionsbedarf der Kommunen. Edition Difü. Berlin.
- Rübensam, J. / Hellmann L. / Staroste, D. / Stoltz, J. (2005): Bericht zum Forschungs- und Entwicklungsvorhaben FE 09.121/2000/MGB des Bundesministerium für Verkehr Bau und Wohnungswesen: Untersuchung zur Wirtschaftlichkeit und Bautechnischen Bewährung von Fahrbahnbefestigungen aus Asphalt auf bestehenden Bundesautobahnen. Heft 914, Forschung Straßenbau- und Straßenverkehrstechnik,. Bremerhaven: Wirtschaftsverband NW Verlag für neue Wissenschaft GmbH.
- Saathoff, J. / Hönig, C. / Klingebiel, B. / Hempelt, L. / Asam, P. / Backhaus, A. / Stroyer, U. (2009): Neubau der Schleuse Sülfeld Süd - Verkehrsfreigabe. In: Tiefbau 2/2009, 66-72.
- Schmied, M. / Mottschall, M. (2010): Treibhausgasemissionen durch die Schieneninfrastruktur und Schienenfahrzeuge in Deutschland. Endbericht des UBA-Projektes FKZ 36301244, unveröffentlicht.

- Schmidt-Bleek, F. / Bringezu, S. / Hinterberger, F. / Liedtke, C. / Spangenberg, J. / Stiller, H. / Welfens, M. J. (1998): MAIA - Handbuch der Materialintensitätsanalyse nach dem MIPS-Konzept. Birkhäuser Verlag, Berlin, Basel, Boston, 1998.
- Schneider, S. (2008): Der kommunale Investitionsbedarf und seine Finanzierungsmöglichkeiten. In: DfK – Deutsche Zeitschrift für Kommunalwissenschaft. 47.Jg, 2008/II, S. 55-76.
- Spielmann, M. / Bauer, C. / Dones, R. / Tuchschnid, M. (2007): Transport Services. Ecoinvent report No. 14. Villigen.
- Statistisches Bundesamt (Destatis) (2010): Statistisches Jahrbuch 2010. Wiesbaden.
- Statistisches Bundesamt (Destatis) (2008a): Statistisches Jahrbuch 2008. Wiesbaden.
- Statistisches Bundesamt (Destatis) (2008b): Eisenbahnverkehr. Betriebsdaten des Schienenverkehrs. Wiesbaden.
- Statistisches Bundesamt (Destatis) (2006): Verkehr in Deutschland 2006. Wiesbaden.
- Statistisches Bundesamt (Destatis) (2005a): Berichtsmodul Verkehr und Umwelt – Band 14 der Schriftenreihe „Beiträge zu den Umweltökonomischen Gesamtrechnungen“; Wiesbaden.
- Statistisches Bundesamt (Destatis) (2005b): Land- und Forstwirtschaft, Fischerei: Bodenfläche nach Art der tatsächlichen Nutzung. Fachserie 3/ Reihe 5.1, Wiesbaden.
- Stiller, H. (1995): Materialintensitätsanalysen von Transportleistungen (2). Binnenschifffahrt. Wuppertal Papers 41. Wuppertal: Wuppertal Institut.
- Stuttgarter Zeitung online vom 15.05.2008: Neckar-Schleusen werden ausgebaut.
- Tölle, L. o.J.: Wasserstraßenkreuz Magdeburg. Erfahrungen und Erkenntnisse beim Bau und nach der Inbetriebnahme.
- Ulbricht, M. (2006): Stoffströme im Tiefbau. Quantifizierung des Ressourcenverbrauchs der deutschen Straßeninfrastruktur. Studienarbeit in der Abteilung Sicherheitstechnik der Bergischen Universität Wuppertal, durchgeführt am Wuppertal Institut. unveröffentlicht.
- UIC (2010): Barron, T. / Martinetti, G. (Systra Conseil): High Speed Railway contribution to sustainable mobility. Gutachten im Auftrag der Internationalen Union of Railways (UIC). Zürich: 2010.
- Vihermaa, L. / Lettenmeier, M. / Saari, A. (2006): Natural resource consumption in rail transport: A note analysing of two Finnish railway line; in: *Transportation Research Part D*, Vol.11 (2006), No. 3, S. 227-232.
- Von Rozycki, C. / Köser, H. / Schwarz H. (2003): Ecology Profile of the German High-speed Rail Passenger Transport System ICE. In: *International Journal of Life Cycle Assessment*, 8(2), S. 83-91.
- Wasser- und Schifffahrtsverwaltung des Bundes WSV (2007): Zweite Moselschleuse. http://www.wsv.de/aktuelles/projekte/zweite_moselschleuse/index.html
- Wasser- und Schifffahrtsverwaltung des Bundes WSV (2008): Bauwerke und Anlagen an Bundeswasserstraßen; http://www.wsv.de/wasserstrassen/bauwerke_und_anlagen/index.html (07.07.2008)
- Wasser- und Schifffahrtsverwaltung des Bundes WSV (2009): Gliederung Bundeswasserstraßen; http://www.wsv.de/wasserstrassen/gliederung_bundeswasserstrassen/index.html (15.03.2009)

- Weisner, A. (2003): Betonanforderungen und Betontechnologie beim Neubau der Doppelschleuse Hohenwarthe am Wasserstraßenkreuz Magdeburg. Beton-Informationen 1.2003.
- Werner, F. (2008): Ökologische Bilanzierung von Eisenbahnschwellen: Vergleich von Schwellen aus Buchenholz, Eichenholz, Beton und Stahl. Eine Studie von Umwelt & Entwicklung im Auftrag der Studiengesellschaft Holzschwellenoberbau e.V. Zürich: 2008.
- Wittmer, D. (2006): Kupfer im regionalen Ressourcenhaushalt. Ein methodischer Beitrag zur Exploration urbaner Lagerstätten. Dissertation an der Eidgenössischen Technischen Hochschule Zürich.
- Wuppertal Institut (2003): MIT-Wertetabelle: Materialintensität von Materialien und Energieträgern im Überblick. http://www.wupperinst.org/uploads/tx_wibeitrag/MIT_v2.pdf (27.01.2011).
- ZTV T-StB 95: Die „Zusätzlichen Technischen Vertragsbedingungen und Richtlinien für Tragschichten im Straßenbau“, Ausgabe 1995/Fassung 2002, behandelt Tragschichten ohne Bindemittel, Tragschichten mit hydraulischen Bindemitteln und Asphalttragschichten.
- ZTV P-StB 2000: Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen und Richtlinien für den Bau von Pflasterdecken und Plattenbelägen

Wasserver- und Entsorgung

- Althaus, H.-J. / Chudacoff, M. / Hischier, R. / Jungbluth, N. / Osses, M. / Primas, A. (2007): Life Cycle Inventories of Chemicals. Ecoinvent Report No. 8, v 2.0 EMPA Dübendorf, Swiss Centre for Life Cycle Inventories, Dübendorf, CH, from [www. Ecoinvent.org](http://www.ecoinvent.org).
- ATT / BDEW / DBVW / DVGW / DWA / VKU (Arbeitsgemeinschaft Trinkwassertalsperren / Bundesverband der deutschen Gas- und Wasserwirtschaft / Deutscher Bund der verbandlichen Wasserwirtschaft / Deutsche Vereinigung des Gas- und Wasserfaches / Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall / Verband kommunaler Unternehmen) (2008): Branchenbild der deutschen Wasserwirtschaft 2008; Bonn: Wirtschafts- und Verlagsgesellschaft Gas und Wasser mbH.
- Baccini, P. / Brunner, P. H. (1991): Metabolism of the Anthroposphere; Berlin et al.: Springer.
- Baccini, P. / Kytzia, S. / Oswald, F. (2001): Restructuring Urban Systems. In: Moavenzadeh, F. / Hanaki, K. / Baccini, P. (Hg.): Future Cities: Dynamics and Sustainability; Boston: MIT Press.
- Bauer, C. / Bolliger, R. / Tuchschild, M. / Faist-Emmenegger, M. (2007): Wasserkraft. Ecoinvent report No.6-VIII. Villigen.
- Bayer, E. / Bose, T. / Kampen, R. / Klose, N. (2004): Betonbauwerke in Abwasseranlagen. Planung, Bau, Instandhaltung. 4. Üb. Aufl. Düsseldorf: Verlag Bau + Technik 2004.
- Bayerisches Landesamt für Umwelt (LfU) (2009a): Staatliche Wasserspeicher in Bayern. http://www.lfu.bayern.de/wasser/fachinformationen/staatliche_wasserspeicher/index.htm
- Bayerisches Landesamt für Umwelt (LfU) (2009b): Wasserspeicher. <http://www.lfu.bayern.de/wasser/fachinformationen/trinkwasserspeicherung/wasserspeicher/index.htm>
- Bayerisches Landesamt für Umwelt (LfU) (2010): Quellschüttung. http://www.lfu.bayern.de/wasser/fachinformationen/grundwasser_quellschuetzung/index.htm

- Berger, C. / Lohaus, J. (2005): Zustand der Kanalisation in Deutschland - Ergebnisse der DWA-Umfrage 2004, *KA Abwasser Abfall*, Vol. 52, Nr. 5, S. 528–539.
- Blum, A. / Stutzriemer, S. (2007): Recycled Construction Minerals for Urban Infrastructure in Germany; Non-technical Issues; *Minerals & Energy* Vol. 22, Nr. 3-4, S. 148-158.
- Boermans-Schwarz, T. (1998): Materialintensitäts-Analyse von Anlagen zur Nutzung von Regenwasser im Haushalt im Kontext einer nachhaltigen Wasserwirtschaft; Diplomarbeit am Fachbereich Sicherheitstechnik der Bergischen Universität Gesamthochschule Wuppertal.
- Bringezu, S. (1998): Bewertung zentraler und dezentraler Abwasserbehandlungssysteme mit den Mitteln der Stoffflussanalyse; in: Wilderer, P. A. / Arnold, E. / Schreff, D. (Hg.): Dezentrale Abwasserbehandlung für ländliche und urbane Gebiete (Abwassertechnisches Seminar).
- Bringezu, S. (2000): Die Analyse der Materialintensität von Infrastrukturen; Wuppertal Papers Nr. 102, Wuppertal.
- Buchert, M. / Fritsche, U. R. / Jenseit, W. / Rausch, L. / Deilmann, C. / Schiller, G. / Siedentop, S. / Lipkow, A. (2004): Nachhaltiges Bauen und Wohnen, Stoffflussbezogene Bausteine für ein nationales Konzept der nachhaltigen Entwicklung - Verknüpfung des Bereiches Bauen und Wohnen mit dem komplementären Bereich "Öffentliche Infrastruktur", Herausgegeben von Umweltbundesamt (UBA), (UBA Texte, 01/04).
- Bundesverband Gas und Wasser BGW (1993): 105. BGW-Wasserstatistik.
- Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU) (Hg.) (2006): Wasserwirtschaft in Deutschland, Teil 1: Grundlagen; Berlin.
- Bundesverband Erneuerbare Energien BEE (2009): Stromversorgung 2020. Wege in eine moderne Energiewirtschaft. Berlin.
- Dachroth, W. (2002): Handbuch der Baugeologie und Geotechnik. 3. erw. + üb. Aufl.. Berlin et al. : Springer.
- Dennison, F. J. / Azapagic, A. / Clift, R. / Colbourne, J. S. (1999): Life Cycle Assessment: Comparing Strategic Options for the Mains Infrastructure – Part I, *Water Science and Technology*, Vol. 39, Nr. 10-11, S. 315 – 319.
- Deutsche Vereinigung des Gas- und Wasserfaches DVGW (2002): DVGW-Schadenstatistik Wasser. Auswertungen für die Erhebungsjahre 1997-1999. Wasser-Information Nr. 67. Bonn: DVGW.
- Deutsche Vereinigung des Gas- und Wasserfaches e.V. DVGW (2004): Technische Regeln Wasserverteilungsanlagen (TRWV) Teil 1: Planung. Technische Regel Arbeitsblatt W 400-1. Bonn, Oktober 2004.
- Deutsche Vereinigung des Gas- und Wasserfaches DVGW (2005): Wasserspeicherung - Planung, Bau, Betrieb und Instandhaltung von Wasserbehältern in der Trinkwasserversorgung. Technische Regel Arbeitsblatt W 300. Bonn, Juni 2005.
- Deutsches TalsperrenKomitee (DTK) (2001): Dams in Germany; Essen: Verlag Glückauf GmbH.
- Deutsches TalsperrenKomitee (DTK) (2003): Journalistenhandbuch zum Wasserbau. Erläuterungen und Ansprechpartner zu den Themen Talsperren, Wasserkraft, Hochwasser u.ä.; <http://www.talsperrenkomitee.de/Journalistenhandbuch.pdf> (07.07.2008).

- Doka, G. (2007): Wastewater Treatment. Life Cycle Inventories of Waste Treatment Services. Ecoinvent report No. 13, Part IV. Swiss Centre for Life Cycle Inventories, Dübendorf.
- Frank, T. / Habedank, C. / Lindenau, V. (2006): Rohrwerkstoffe in der öffentlichen Abwasserentsorgung. Verbreitung, Erfahrung und mögliche Kostensenkungspotenziale; UNITRACC-Artikel vom 20.10.2006; <http://www.unitracc.de> (07.07.2008).
- Gerdes, A. / Wittmann, F.H. (2003): Langzeitverhalten von zementgebundenen Beschichtungen in Trinkwasserbehältern. In: 6th International Conference on Materials Science and Restoration, 1-14.
- Gillar, M. (2008): Schachtsanierung. Verfahren und Qualitätssicherung; Vortrag am Tag der Forschung des IKT Institut für Unterirdische Infrastruktur am 03.06.2008 in Gelsenkirchen.
- Hahmann, S. / Becher, M. (2008): Bereitstellung von Löschwasser. In: *energie wasser praxis* 11/2008, 42-44.
- Harting, K. (2006): Abwasserdruckleitungen. Möglichkeiten und Verfahren zur Reinigung. Kurzbericht. Gelsenkirchen: Institut für Unterirdische Infrastruktur IKT.
- Hillenbrand, T. (2009): Analyse und Bewertung neuer urbaner Wasserinfrastruktursysteme. Dissertation, Karlsruhe.
- Hosang, W. / Bischof, W. (1998): Abwassertechnik; Leipzig: Teubner Verlag. Hillenbrand 2009.
- IKT Institut für Unterirdische Infrastruktur (2004): IKT-eNewsletter-Reihe "Struktur der Abwasserversorgung in Nordrhein-Westfalen".
- IKT Institut für Unterirdische Infrastruktur (2006): IKT-Marktumfrage: Kanalinvestitionen steigen 2007 um 10%; UNITRACC-Artikel vom 08.12.2006; <http://www.unitracc.de> (07.07.2008).
- Imhoff, K. / Imhoff, K. R. (2007): Taschenbuch der Stadtentwässerung, 30. Auflage; München: Oldenbourg Industrieverlag.
- International Commission on Large Dams (ICOLD) (2003): World Register of Dams.
- Jekel, M. / Remy, C. / Ruhland, A. (2006): Ecological Assessment of Alternative Sanitation Concepts with Life Cycle Assessment. Final Report for Subtask 5 of the Demonstration Project "Sanitation Concepts for Separate Treatment of Urine, Faeces and Greywater" (SCST).
- Klinger, J. (2007): Beschreibung der Wasser- und Stoffflüsse in einem urbanen Raum unter besonderer Berücksichtigung von Kanalleckagen. Dissertation an der Fakultät für Bauingenieur-, Geo- und Umweltwissenschaften der Universität Karlsruhe.
- Kluge, T. / Scheele, U. (2003): Transformationsprozesse in netzgebundenen Infrastruktursektoren. Neue Problemlagen und Regulationserfordernisse; Berlin: Deutsches Institut für Urbanistik (netWORKS Papers, 1).
- Koziol, M. / Veit, A. / Walther, J. (2006): Stehen wir vor einem Systemwechsel in der Wasservers- und Abwasserentsorgung? Sektorale Randbedingungen und Optionen im stadttechnischen Transformationsprozess. netWORKS-Paper Nr. 22.
- Kunststoffrohrverband e.V. KRV 2002: Kunststoffrohrsysteme für die Trinkwasserversorgung. Bonn.
- Landestalsperrenverwaltung des Freistaates Sachsen (LTV) (2007): Talsperren in Sachsen; Pirna: LTV Sachsen.

- Landestalsperrenverwaltung des Freistaates Sachsen LTV (2009): Ausgewählte Bauvorhaben. <http://www.ltv.smul.sachsen.de/bauvorhaben/>
- Landestalsperrenverwaltung des Freistaates Sachsen LTV (2010): Neubau des Hochwasserrückhaltebeckens Neuwürschnitz. http://www.smul.sachsen.de/ltv/download/LTV_FL_Buergerinfo_Neuwuerschnitz_27.4.pdf
- Landeswasserverbandstag Brandenburg e.V. (LWT) (2005): Lagebericht 2005. Trinkwasserversorgung / Abwasserentsorgung im Dienste der Kunden; Berlin.
- Lassaux, S. / Renzoni, R. / Germain, A. (2007): Life Cycle Assessment of Water from the Pumping Station to the Wastewater Treatment Plant. In: *International Journal of Life Cycle Assessment* 12 (2), 118-126.
- Markus, D. / Manstein, C. / Liedtke, C. (1996): Materialintensitätsanalysen von Grund-, Werk- und Baustoffen (4). Der Werkstoff PVC. Materialintensität eines Trinkwasserrohrs; Wuppertal Paper 63, Wuppertal: Wuppertal Institut.
- Merkel, G. (2004): Trinkwasserbehälter. Planung, Bau, Betrieb, Schutz und Instandsetzung; München: Oldenbourg Industrieverlag.
- Merkel, G. (2008): Technik der Wasserversorgung. Praxisgrundlagen für Führungskräfte; München: Oldenbourg Industrieverlag.
- Mutschmann J. / Stimmelmayer, F. (2007): Taschenbuch der Wasserversorgung; München: Oldenbourg Industrieverlag.
- Preußner, J. (2007): Neue strategische Entwicklungen zum Bau von Hochwasserspeichern. http://www.wwar.bayern.de/projekte_und_programme/doc/drachensee/symposium/ppreusser.pdf
- Puhl, R. (2007): Handbuch Schacht. Technik, Grundlagen, Marktübersicht; Herausgegeben vom IKT Institut für unterirdische Infrastruktur Gelsenkirchen.
- Reckerzügl, T. (1997): Vergleichende Materialintensitäts-Analyse zur Frage der zentralen oder dezentralen Abwasserbehandlung anhand unterschiedlicher Anlagenkonzepte; Diplomarbeit an der Universität-Gesamthochschule Paderborn, Abteilung Höxter, erstellt am Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie.
- Regierungspräsidium Freiburg (2008): Hochwasserrückhaltebecken Wolterdingen / Breg. Integriertes Donauprogramm. Freiburg 2008.
- Reidenbach, M. / Bracher, T. / Grabow, B. / Schneider, S. / Seidel-Schulze, A. (2008): Investitionsrückstand und Investitionsbedarf der Kommunen Ausmaß, Ursachen, Folgen, Strategien. Edition Difü. Berlin.
- Reineck, T. (2007): Berstlining-Verfahren in der Großstadt, mit Sicherheit kein Widerspruch. In: RSV-Sonderdruck: 25 Jahre Rohrleitungserneuerung mit Berstverfahren. Essen.
- Rißler, P. (1998): Talsperrenpraxis; München: Oldenbourg Industrieverlag.
- Roscher, H. (2000): Zustandsbewertung städtischer Wasserrohrleitungen zur Vorbereitung der Rehabilitation. In: *Rohrbau* 2000, Weimar 6./7.12.2000 Tagungsband 9, S. 5 – 14.
- Roscher, H. (2006): Talsperren und Fernwasserversorgungssysteme in Thüringen.
- Sachverständigenbüro Fischer (2009): Kanalbauwerke. www.sachverstaendigenbuero-fischer.de (07.03.2009).

- Schulze, D. (1998): Die Wasserspeicherung: Planung, Bau und Betrieb von Erdbehältern. Schriftenreihe Wasserversorgungs- und Abwassertechnik. Essen: Vulkan-Verlag.
- Siedentop, S. / Schiller, G. / Koziol, M. / Walther, J. / Gutsche, J.-M. (2006): Siedlungsentwicklung und Infrastrukturfolgekosten – Bilanzierung und Strategieentwicklung. Endbericht.
- Statistisches Bundesamt (Destatis) (Hg.) (2009): Öffentliche Wasserversorgung und Abwasserbeseitigung 2007; Fachserie 19 Reihe 2.1.; Wiesbaden: Statistisches Bundesamt.
- Statistisches Bundesamt (Destatis) (Hg.) (1994): Öffentliche Wasserversorgung und Abwasserbeseitigung 1991. Fachserie 19 Reihe 2.1.; Wiesbaden: Statistisches Bundesamt.
- Stein, D. / Stein, R. (2004): Fachinformationssystem Instandhaltung von Kanalisationen; <http://www.unitracc.de> (07.07.2008).
- Stein, D. / Falk, C. (2004): Sanierung von Schächten; UNITRACC-Artikel vom 19.02.2004; <http://www.unitracc.de> (07.07.2008).
- Talsperrenbetrieb Sachsen-Anhalt (2010): Talsperrenbetrieb Sachsen-Anhalt.
- Thüringer Fernwasser (2010): Der Rückbau der Talsperre Krebsbach – Das erste Projekt seiner Art in Deutschland. www.thueringer-fernwasser.de
- Tietz, H.-P. (2006): Systeme der Ver- und Entsorgung; Wiesbaden: Teubner Verlag.
- Tillman, A.-M. / Svingby, M. / Lundström, H. (1998): Life Cycle Assessment of Municipal Waste water Systems. In: *International Journal of Life Cycle Analysis* 3 (3), 145-157.
- Venkatesh, G. / Hammervold, J. / Brattebo, H. (2009): Combined MFA-LCS for Analysis of Wastewater Pipeline Networks. Case Study of Oslo, Norway. In: *Journal of Industrial Ecology* 13 (4), 532-550.
- Wagner, V. (2007): Sanierung von Pumpwerken und Schächten; Präsentation auf der 16. Sprechertagung der ÖWAV-Kanal- und Kläranlagen-Nachbarschaften.
- Waniek, R. (2008): IKT-Marktumfrage 2007; UNITRACC-Artikel vom 16.01.2008; <http://www.unitracc.de> (07.07.2008).
- Westerhof, C. (2001): Einführung eines Ressourcenmanagementsystems bei den Stadtwerken Düsseldorf; Diplomarbeit an der Fachhochschule Braunschweig / Wolfenbüttel, Fachbereich Transport und Verkehrswesen.
- Wilderer, P. A. / Merkl, G. (Hg.) (2001): Wasserversorgung in der Zukunft unter besonderer Berücksichtigung der Wasserspeicherung. Berichte aus Wassergüte- und Abfallwirtschaft; TU München.
- Windesperger, A. / Steinlechner, S. / Schneider, F. (1999): Investigation on European Life Cycle Assessment Studies of Pipes made of Different Materials for Water Supply and Sewer Systems – A Critical Comparison; Final Report. St. Pölten, Österreich: Institut für Industrielle Ökologie.
- Zesch, H. (2009): Übersicht der Techniken und Erfahrungen in der Kanalsanierung. In: *3R International* 48 (10), 562-571.
- Zimmermann, P. / Doka, G. / Huber, F. / Labhardt, A. / Ménard, M. (1996): Ökoinventare von Entsorgungsprozessen. Grundlagen zur Integration der Entsorgung in Ökobilanzen; ESU-Reihe 1/96; Zürich: Institut für Energietechnik an der ETH Zürich.

Energieerzeugung und -verteilung

- Arbeitsgemeinschaft für Wärme und Heizkraftwirtschaft e.V. (AGFW) (2007): AGFW-Branchenreport 2007; Frankfurt/Main: AGFW.
- Arbeitsgemeinschaft für Wärme und Heizkraftwirtschaft e.V. (AGFW) (2005): Perspektiven der Fernwärme und der Kraft-Wärme-Kopplung. Ergebnisse und Schlussfolgerungen aus der AGFW-Studie „Pluralistische Wärmeversorgung.
- AXPO (2010): Umweltdeklaration Niederdruckwasserkraftwerk Wildegg-Brugg.
- Bauer, C. / Bolliger, R. / Tuchschnid, M. / Faist-Emmenegger, M. (2007): Wasserkraft. Ecoinvent report No.6-VIII. Villigen.
- Bauer, C. (2008): Life Cycle Assessment of Fossil and Biomass Power Generation Chains. An analysis carried out for ALSTOM Power Services. PSI Bericht Nr. 08-05. Villigen.
- Baumgartner, W. / Doka, G. (1998): Energiebilanzen von Kleinwasserkraftwerken. Bundesamt für Energiewirtschaft Bern.
- BDEW (2009): Energiemarkt Deutschland. Zahlen und Fakten zur Gas -, Strom- und Fernwärmeversorgung.
- BDEW (2008a): Presseinformation vom 19.2.2008. http://www.bdew.de/bdew.nsf/id/DE_PM_20080219_20_Kraftwerke_im_Bau?open&l=DE&ccm=250010010020
- BDEW (2008b): Investitionen der deutschen Stromversorger.
- Brakelmann, H. (2004): Netzverstärkungs-Trassen zur Übertragung von Windenergie: Freileitung oder Kabel?. Studie im Auftrag des Bundesverbandes Wind Energie e.V.
- Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU) (2011): Erneuerbare Energien 2010. Daten des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit zur Entwicklung der erneuerbaren Energien in Deutschland im Jahr 2010 auf der Grundlage der Angaben der Arbeitsgruppe Erneuerbare Energien-Statistik (AGEE-Stat). Vorläufige Angaben, Stand 23. März 2011. http://www.erneuerbare-energien.de/files/bilder/allgemein/application/pdf/ee_in_zahlen_2010_bf.pdf
- Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU) (2008): Kurzinfo Wasserkraft.
- Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU) (2004): Erneuerbare Energien – Innovationen für die Zukunft. http://www.dlr.de/tt/Portaldata/41/Resources/dokumente/institut/system/publications/broschuere_ee_innov_zukunft.pdf
- Bundesnetzagentur (2009): Monitoringbericht 2008. Bonn.
- Bundesnetzagentur (2008): Monitoringbericht 2007. Bonn.
- Bundesnetzagentur (2006): Untersuchungsbericht über die Versorgungsstörungen im Netzgebiet des RWE im Münsterland vom 25.11.2005. Bonn.
- Bundesverband WindEnergie e.V. (BWE) (o.J.): Konstruktiver Aufbau. Das Fundament; <http://www.wind-energie.de/de/technik/konstruktiver-aufbau/fundament/> (27.01.2011).
- Bundesverband Windenergie (2010): <http://www.wind-energie.de/de/materialien/foien-sammlung/#1698> (Zugriff 15.01.2010).
- Burger, B. / Bauer, C. (2007): Windkraft. Ecoinvent report No. 6-XIII. Villigen.

- Besier, R. (2007): Veränderung der Fernwärmerohrnetze in Deutschland. Rohrnetzstatistik 2006 der AGFW; *EuroHeat&Power*, Vol. 36, Nr. 11, S. 32-35.
- Besier, R. (2006): Veränderung der Fernwärmerohrnetze in Deutschland. Rohrnetzstatistik 2005 der AGFW; *EuroHeat&Power*, Vol. 35, Nr. 9, S. 52-55.
- Briem, S. / Blesl, M. / Fahl, U. / Ohl, M. / Moerschner, J. / Eltrop, L. / Voß, A. (2004): Lebenszyklusanalysen ausgewählter zukünftiger Stromerzeugungstechniken. Stuttgart: Institut für Energiewirtschaft und Rationelle Energieanwendung, Universität Stuttgart, 2004.
- DBFZ (2010): Monitoring zur Wirkung des Erneuerbare-Energie-Gesetz (EEG) auf die Entwicklung der Stromerzeugung aus Biomasse.. Zwischenbericht März 2010.
- Deutsche Wind.Guard (2005): Potenzialanalyse „Repowering in Deutschland“ Endbericht. Studie im Auftrag WAB Windenergieagentur Bremerhaven.
- DEWI (2009): Status der Windenergienutzung in Deutschland zum 31.12.2008. http://www.wind-energie.de/fileadmin/dokumente/statistiken/WE%20Deutschland/DEWI-Statistik_gesamt_2009.pdf (Zugriff 15.10.2010)
- Deutsche Energie-Agentur GmbH (dena) (2005): Energiewirtschaftliche Planung für die Netzintegration von Windenergie in Deutschland an Land und Offshore bis zum Jahr 2020.
- Doka, G. (2007): Building material disposal. Ecoinvent report. No. 13-V. Villigen.
- Dones, R. (2007): Kernenergie. Ecoinvent report No. 6-VII. Villigen.
- Dones, R. / Bauer, C. / Röder, A. (2007): Kohle. Ecoinvent report No. 6-VI. Villigen.
- Drenckhan, A. / Eger, M. / Estermann, A. S. (2006): Entry-Exit-System – Aufgaben für das Gaswirtschaftsjahr 2006/2007. *Energie/Wasser-Praxis*, Vol. 57, Heft 12 (Jahresrevue). S. 60-63.
- Edelmann, W. / Schleiss, K. / Engeli, H. / Baier, U. (2001): Ökobilanz der Stromgewinnung aus landwirtschaftlichem Biogas. Schlussbericht im Auftrag des Amtes für Energie. Bern.
- Effenberger, M. / Bachmaier, H. / Kränsel, E. / Lehner, A. / Gronauer, A. (2009): Wissenschaftliche Begleitung der Pilotbetriebe zur Biogasproduktion in Bayern. Abschlussbericht.
- E.ON Ruhrgas AG (2007): Erdgaswirtschaft im Überblick. Markt, Leistung, Perspektive.
- E.ON (2006): Stade. Stilllegung und Rückbau eines Kernkraftwerks – vom Kernkraftwerk zur „Grünen Wiese“.
- Ernst, H. (2008): Vom Feigenblättchen und Spartenzweig zum Königsweg. Zukunft des Strom- und Wärmemarktes; *EuroHeat&Power*, Vol. 37, Nr. 4, S. 11-29.
- Etscheid, G. (2008): Es gärt; *DIE ZEIT*, Nr. 21, S. 30.
- Faist-Emmenegger, M. / Heck, T. / Jungbluth, N. / Tuchschnid, M. (2007): Erdgas. Ecoinvent report No. 6-V. Villigen.
- Frisknecht, R. / Tuchschnid, M. / Faist-Emmenegger, M. (2007): Strommix und Stromnetz. Ecoinvent report No. 6-XVI. Villigen.
- Frisknecht, R. / Hofstetter, P. / Knoepfel, I. / Ménard, M. (1994): Ökoinventare für Energiesysteme. Grundlagen für den ökologischen Vergleich von Energiesystemen und den Einbezug von Energiesystemen in Ökobilanzen für die Schweiz; im Auftrag des Bundesamtes für Energiewirtschaft und des nationalen Energie-Forschungs-Fonds; ETH Zürich, Zürich.

- Fritsche, U. R. / Schmidt, K. (2008): Handbuch zu GEMIS 4.5. Globales Emissions-Modell Integrierter Systeme (GEMIS). Darmstadt.
- Forschungsstelle für Energiewirtschaft FfE (1996): Ganzheitliche energetische Bilanzierung der Energiebereitstellung (GaBiE). München.
- Fraunhofer Institut UMSICHT / bremer energie institut (2004): Fernwärme-Infrastruktur; Teil 4 des 3. Band „Zukunft der KWK und der Fernwärme, modellgestützte Hochrechnungen, vergleichende Betrachtungen, zukünftige Anforderungen“ des Projektes „Pluralistische Wärmeversorgung“.
- Geuder, M. (2004): Energetische Bewertung von Windkraftanlagen. Diplomarbeit an der Fachhochschule Würzburg-Schweinfurt.
- Gores, S. (2010): Markt für Blockheizkraftwerke. Absatz 2009 und aktuelle Entwicklung. <http://www.bkwk.de/aktuelles/presse/2010-12-13%20BHKW-Marktentwicklung.pdf>
- Hahn, B. (2003): Zuverlässigkeit, Wartung und Betriebskosten von Windkraftanlagen.
- Heck, T. (2007): Wärme-Kraft-Kopplung. Ecoinvent report No. 6-XIV. Villigen.
- Hennings, W. / Bauknecht, D. / Preuschoff, S. (2006): Ökobilanzen für den Sektor Strom und Gas. Studie im Rahmen des BMBF-Verbundprojektes „Integrierte Mikrosysteme der Versorgung“.
- Hirschberger, S. / Bauer, C. / Burgherr, P. / Biollaz, S. / Durisch, W. / Foskolos, K. / Hardegger, P. / Meier, A. / Schenler, W. / Schulz, T. / Stucki, S. / Vogel, F. (2005): Neue erneuerbare Energien und neue Nuklearanlagen: Potenziale und Kosten. PSI Bericht Nr. 05-04. Paul Scherrer Institut. Villigen.
- Hornbacher, D. / Mairitsch, K. (2007): Aufbereitung von Biogas zur Einspeisung in das Erdgasnetz; *EuroHeat&Power*, Vol. 36, Nr. 1-2, S. 42-46.
- Institut für Energetik und Umwelt / Stefan Klinski / DBI Gas- und Umwelttechnik / Fraunhofer Institut UMSICHT / Gaswärme-Institut (2006): Einspeisung von Biogas in das Erdgasnetz; Endbericht des Projektes "Evaluierung der Möglichkeiten zur Einspeisung von Biogas in das Erdgasnetz"; Herausgegeben von der Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V. (FNR); FNR: Gülzow.
- IER / DLR / LEE / FfE (2004): Lebenszyklusanalyse ausgewählter zukünftiger Stromerzeugungstechniken. Studie im Auftrag des Bundesministeriums für Wirtschaft und Arbeit.
- Jensch, W. (1988): Vergleich von Energiesystemen unterschiedlicher Zentralisierung. IfE-Schriftenreihe Heft 22. München.
- Jungbluth, N. / Faist-Emmenegger, M. / Dinkel, F. / Stettler, C. / Doka, G. / Chudacoff, M. / Dau-riat, A. / Gansounou, E. / Spielmann, M. / Sutter, J. / Kljun, N. / Keller, M. / Schleiss, K. (2007): Life Cycle Inventories of Bioenergy. Ecoinvent report No. 17. Villigen.
- Kehrbaum, R. (1995): Perspektiven eines Recycling von Windkraftanlagen. In: DEWI Magazin Nr. 7, August 1995, S. 35-38.
- Manstein, C. (1996): Das Elektrizitätsmodul im MIPS-Konzept – Material-Analyse der bundes-deutschen Stromversorgung (öffentliches Netz) im Jahr 1991, Wuppertal Paper Nr. 51, Wuppertal: Wuppertal Institut.
- Manstein, C. (1995): Quantifizierung und Zurechnung anthropogener Stoffströme im Energiebe-reich. Diplomarbeit an der Bergischen Universität Wuppertal.

- Marheinecke, T. (2001): Lebenszyklusanalyse fossiler, nuklearer und regenerativer Stromerzeugungstechniken. Forschungsbericht Institut für Energiewirtschaft und Rationelle Energieanwendung der Universität Stuttgart, Band 87.
- Martinez, E. / Sanz, F. / Pellegrini, S. / Jiménez, E. / Blanco, J. (2009): Life-cycle assessment of a 2-MW rated power wind turbine: CML method. In: *International Journal of Life Cycle Assessment* (14), pp: 52-63.
- Mayer-Spohn, O. / Wissel, A. / Voß, A. / Fahl, U. / Blesl, M. (2007): Lebenszyklusanalyse ausgewählter Stromerzeugungstechniken. Aktualisierte Fassung des Arbeitsberichtes.
- Nitsch, J. (2008): „Leitstudie 2008“. Weiterentwicklung der „Ausbaustrategie Erneuerbare Energien“ vor dem Hintergrund der aktuellen Klimaschutzziele Deutschlands und Europas. Studie im Auftrag des BMU.
- Nitsch, J. et al. DLR / ifeu / Wuppertal Institut (2004): Ökologisch optimierter Ausbau der Nutzung erneuerbarer Energien in Deutschland. Forschungsvorhaben für das Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit.
- Olzem, B. (2010): Produktion, Aufbereitung und Einspeisung von Biogas, Aktueller Stand in Deutschland. In: Forum. New Power 4/2010, S. 4-6.
- Oswald, B. R. (2005): Vorlesung Elektrische Energieversorgung I – Skript Freileitung (Korrigierte Ausgabe 2005); Universität Hannover Institut für Energieversorgung und Hochspannungstechnik.
- Paul, H.U. (2007): Kabel oder Freileitung? Informationsveranstaltung zum Ausbau des Hoch- und Höchstspannungsnetz, 20.9.2007 Groß Dungen.
- Ramesohl, S. / Scholwin, F. / Hofmann, F. / Urban, W. / Burmeister, F. (2006): Analyse und Bewertung der Nutzung von Biogas, Teil 1: Potenziale, Kosten und Emissionen; *BWK - Das Energie Fachmagazin*, Vol. 58, Nr. 3. S. 45-49.
- Ravenmark, D. / Normark, B. 2005: Unsichtbar und umweltschonend. Unterirdische Energieübertragung mit HVDC Light. In: *ABB Technik* 4/2005.
- Salzer, C. 2008: Die Materialintensität der europäischen Elektrizitätserzeugung. Eine Bilanzierung nach dem MIPS-Konzept. Bachelorarbeit an der Bauhaus-Universität Weimar.
- Schmitz, K. (2008): Hauptbericht der Fernwärmeversorgung 2006; *EuroHeat&Power*, Vol. 36, Nr. 1-2, S.28-32.
- Seebach, A. / Böse, C. / Walter, S. (2007): Aufbereitung und Einspeisung von Biogas in das Erdgasnetz; *EuroHeat&Power*, Vol. 36, Nr. 9, S. 42-45.
- Soukup, O. (2008): Erstellung von Produktökobilanzen auf der Basis von Stoffstromnetzen für die Bereitstellung von Biogas zur Einspeisung in das Erdgasnetz. Diplomarbeit an der Leuphana-Universität Lüneburg.
- Steinbrich, K. (2005): Untersuchungen zum frequenzabhängigen Übertragungsverhalten von Energiekabeln. Dissertation am Fachbereich Ingenieurwissenschaften der Universität Duisburg-Essen.
- Tryfonidou, R. (2006): Energetische Analyse eines Offshore-Windparks unter Berücksichtigung der Netzintegration. Dissertation an der Fakultät für Maschinenbau der Ruhr-Universität Bochum.
- Umweltbundesamt Deutschland (2006): Datenbank der in Betrieb befindlichen Kraftwerke; Verband der Netzbetreiber (VDN) (2007): Daten und Fakten Stromnetze in Deutschland 2007.

- Vestas (2006): Life cycle assessment of electricity produced from onshore sited wind power plants based on Vestas V82-1.65 MW turbines.
- Voß, A. / Blesl, M. (2005): Wachstumspotenzial der Nah-/Fernwärme in Deutschland bis 2020; *EuroHeat&Power*, Vol. 34, Nr. 4, S. 18-30.
- Wagner H.J. (2004): Wie sauber sind die weißen Riesen? Ganzheitliche Energiebilanz von Windkraftanlagen. In: *maschinenbau* RUBIN 2004. S. 6-11.
- Winkens, H. P. (1994): Fernwärmespeicherung, -transport und -verteilung. IKARUS. Instrumente für Klimagas-Reduktionsstrategien. Teilprojekt 4 „Umwandlungssektor“. Forschungszentrum Jülich.
- Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie / Fraunhofer Institut UMSICHT / IFEU (2008): Nachhaltige Flächennutzung und nachwachsende Rohstoffe; Endbericht des F+E-Vorhaben „Optionen einer nachhaltigen Flächennutzung und Ressourcenschutzstrategien unter besonderer Berücksichtigung der nachhaltigen Versorgung mit nachwachsenden Rohstoffen“; UBA Vorhaben Z 6 – 91 054/82 Forschungskennzahl (FKZ) 205 93 153; (08.06.2008).
- Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie / Institut für Energetik und Umwelt / Fraunhofer Institut UMSICHT / Gaswärme-Institut (2005): Analyse und Bewertung der Nutzungsmöglichkeiten von Biomasse. Wuppertal: Wuppertal Institut.

Ohne thematische Zuordnung

- BGR (2007): Bundesrepublik Deutschland, Rohstoffsituation 2006, Hannover.
- MIRO (2009): Die Kies-/Sand- und Naturstein-Industrie im Zeitraum 2009/2010. http://www.bv-miro.org/d/Situation_Branche_Home_2009-2010.pdf (27.01.2011).
- Scharp, M. (2010): IuK-Infrastrukturen: Mobilfunk. Endbericht. UBA-Projekt Materialeffizienz und Ressourcenschonung, FKZ 370793300.

9 Anhang

Teilnehmerliste ExpertInnen-Workshop am 27. Januar 2010
in der Berlin-Brandenburgischen Akademie der Wissenschaften

Teilnehmer	Institution, E-Mail
Bringezu, Dr. Stefan	Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie FG 3 Stoffströme und Ressourcenmanagement
Brinkmann, Anna	Umweltbundesamt, I 3.1 Umwelt und Verkehr
Deilmann, Clemens	Leibniz-Institut für ökologische Raumentwicklung
Fekkak, Miriam	Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie FG 3 Stoffströme und Ressourcenmanagement
Fritsche, Uwe R.	Öko-Institut e.V. Energie und Klimaschutz
Gerber, Dr. Ulf	TU Dresden Professur für Gestaltung von Bahnanlagen
Hennicke, Prof. Dr. Peter	Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie
Herkner, Thomas	BDEW Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft e.V.
Hillenbrand, Dr. Thomas	Fraunhofer Institut für System- und Innovationsforschung ISI Geschäftsfeld Wasserwirtschaft
Hillmann, Roderich	Bundesanstalt für Straßenwesen
Hintemann, Ralf	Borderstep Institut
Klassert, Dr. Anton	DKI Deutsches Kupferinstitut
Klusmann, Dr. Bernd	BITKOM e.V. Technologie Green IT Beratungsbüro
Köhn, Marina	Umweltbundesamt, Z 7-B Informationstechnik
König, Dr. Florian	BITKOM e.V. Kommunikation Green IT Beratungsbüro
Koziol, Prof. Dr. Matthias	Brandenburgische Technische Universität Cottbus Institut für Städtebau und Landschaftsplanung
Link, Dr. Heike	DIW Berlin Abteilung Energie, Verkehr, Umwelt
Löwe, Christian	Umweltbundesamt, III 1.1 Produktbezogener Umweltschutz
Müller, Felix	Umweltbundesamt, III 2.2 Stoffkreisläufe, Mineralindustrie
Penn-Bressel, Gertrude	Umweltbundesamt, FGL I 2.3
Sardison, Dr. Markus	Telefonica O2 Environmental Management External Communications
Scharp, Dr. Michael	Institut für Zukunftsstudien und Technologiebewertung
Schiller, Georg	Leibniz-Institut für ökologische Raumentwicklung
Schmied, Martin	Öko-Institut e.V. Infrastruktur und Unternehmen
Steger, Sören	Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie FG 3 Stoffströme und Ressourcenmanagement

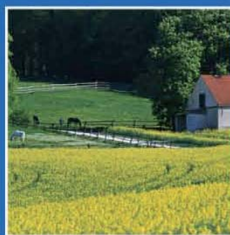
Stoffregen, Alexander	PE International
Tananow, Dr. Oliver	Telefonica O2 Blitzschutz, Network, Regional Engineering Build North-East
Vollmer, Carla	Umweltbundesamt, I 2.3 Erneuerbare Energien
Wachsmann, Ulrike	Umweltbundesamt, I 2.2 Energiestrategien und Szenarien
Wehmeier, Dr. Thomas	Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung Referat I 5 Verkehr und Umwelt
Woitäs, Alexander	VDI Zentrum Ressourceneffizienz

Dr. Michael Scharp

IZT – Institut für Zukunftsstudien und Technologiebewertung

Materialbestand und Materialflüsse der IuK-Infrastrukturen: Mobilfunk

Meilensteinbericht des Arbeitspakets 2.3 des Projekts
„Materialeffizienz und Ressourcenschonung“ (MaRes)



Wuppertal, Juli 2011

ISSN 1867-0237

Kontakt zu den Autor(inn)en:

Dr. Michael Scharp

IZT – Institut für Zukunftsstudien und Technologiebewertung
14129 Berlin, Schopenhauerstraße 26

Tel.: +49 (0) 30 803088 -14, Fax: -88

Mail: m.scharp@izt.de



Institut für Zukunftsstudien und Technologiebewertung
Institute for Future Studies and Technology Assessment

*„Materialeffizienz und Ressourcenschonung“
(MaRes) – Projekt im Auftrag des BMU | UBA*

Projektlaufzeit: 07/2007 – 12/2010

Projektleitung:

Dr. Kora Kristof / Prof. Dr. Peter Hennicke

Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie GmbH
42103 Wuppertal, Döppersberg 19

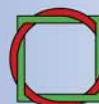
Tel.: +49 (0) 202 2492-183 / -136, Fax: -198 / -145

Mail: kora.kristof@wupperinst.org
peter.hennicke@wupperinst.org

© Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie GmbH

Weitere Informationen zum Projekt

„Materialeffizienz und Ressourcenschonung“ (MaRes)
finden Sie unter **www.ressourcen.wupperinst.org**



Wuppertal Institut
für Klima, Umwelt, Energie
GmbH

Wuppertal Institut
in Kooperation mit

BASF
Borderstep
CSCP
Daimler
demea – VDI / VDE-IT
ECN
EFA NRW
FhG IAO
FhG UMSICHT
FU Berlin
GoYa!
GWS
Hochschule Pforzheim
IFEU
Institut für Verbraucherjournalismus
IÖW
IZT
MediaCompany
Ökopool
RWTH Aachen
SRH Hochschule Calw
Stiftung Warentest
ThyssenKrupp
Trifolium
TU Berlin
TU Darmstadt
TU Dresden
Universität Kassel
Universität Lüneburg
ZEW

Gefördert wird das Vorhaben im Rahmen des UFOPLAN
durch das BMU und das UBA, Förderkennzeichen: 3707 93 300

Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung
liegt bei den Autor(inn)en.



Bundesministerium
für Umwelt, Naturschutz
und Reaktorsicherheit

**Umwelt
Bundes
Amt**
Für Mensch und Umwelt

Inhalt

0	Kurzfassung	7
0.1	Architektur des Mobilfunksystems	7
0.2	Abschätzung der gebundenen Massen	8
0.3	Ressourcenbilanz für ausgewählte Bauteilgruppen und Stoffe	10
0.4	Ressourcenflüsse durch das Mobilfunksystem	10
0.5	Zusammenfassung	12
1	Anwendungen von IuK-Systemen	14
1.1	Vom Kupfer zum Funk und zur Glasfaser	15
1.2	Satellitensysteme	16
1.3	Festnetz	18
1.4	Internet	19
1.5	Wireless Local Area Network WLAN	20
1.6	Öffentlicher Mobilfunk	20
1.7	Spezieller Mobilfunk	21
1.8	Hörfunk	22
1.9	Fernsehen	22
1.10	Parallelität der Infrastrukturen	23
2	Architektur des Mobilfunksystems	24
2.1	Primäre Bestandteile der Mobilfunk-Systemteile	27
2.1.1	Basisstationen (BTS/RNS)	28
2.1.2	Basisstationen Controller (BSC/RNC)	38
2.1.3	Mobile Switching Center (MSC)	40
2.1.4	Operation and Maintenance Center (OMC/NMS)	43
2.1.5	Administration	43
2.2	Weitere Mobilfunknetze	43
2.3	Sekundäre Infrastruktur des Mobilfunks	45
3	Abschätzung der Ressourcenintensität des Mobilfunknetzes	46
3.1	Systemgrenzen	46
3.2	Annahmen für die vier Ebenen des Mobilfunksystems	46
3.2.1	Base Station Subsystem	46
3.2.2	Radio Subsystem	52
3.2.3	Network Switching System	54
3.2.4	Operation and Maintenance Subsystem	55
3.3	Abschätzung der gebundenen Massen	56
3.4	Ressourcenbilanz für ausgewählte Bauteilgruppen und Stoffe	60
3.5	Ergebnisübersicht zur Ressourcenbilanz	65
4	Abschätzung der Ressourcenflüsse im Mobilfunksystem	66
4.1	Einleitung und systemische Problemlagen	66
4.2	Lebens- und Nutzungsdauer von Bestandteilen des BSS und RSS	67
4.3	Lebens- und Nutzungsdauer von Bestandteilen des NSS	70
4.4	Ressourcenflüsse in einem Steady-State-Szenario	71
4.5	Ressourcenflüsse in einem Ausbau-Szenario für UMTS (UMTS 20XX)	74
4.6	Zusammenfassung der Ergebnisse	77
5	Literatur	79

Glossar

	BSS Base Subsystem	BSS	NSS	Sonstiges	Kommentar
AUC	AuC Authentication Center		X		Datenbank für die Gesprächsverschlüsselung
BG	Billing Gateway			X	Center für Kundendienste (Abrechnung)
BOS	Behörde für Organisation und Sicherheitsaufgaben			X	Name des neuen Behördenfunks
BSC	Base Station Controller		X		Steuerung der GSM-Basisstationen
BSS	Base Subsystem	X			Funkzelle mit Basisstation
BTS	Base Transceiver Station	X			Basisstation im GSM-Netz
EDGE	Enhanced Data Rates for Global Evolution			X	Übertragungsstandard, Übergang von GSM zu UMTS
EIR	Equipment Identity Register		X		Datenbank für die Benutzeridentifikation
GGSN	Gateway GPRS Support Nodes		X		Schnittstelle zu den Datendiensten anderer Netze (Internet)
GMSC	Gateway Mobile Switching Center		X		Vermittlungseinheit in dem MSC als Schnittstelle im eigenen und zu anderen Netzen
GPS	Global Positioning System			X	Ortungssystem auf Basis von Satellitennavigation
GSM	Global System for Mobile Communication			X	Mobilfunkstandard
GSM-R	Global System for Mobile Communications - Rail(way)			X	Mobilfunknetz für die Eisenbahnen
HLR	Home Location Register		X		Datenbank für Benutzerdaten
HSCSD	High Speed Circuit Switched Data			X	Datenübertragung im GSM-Netz mit größerer Bandbreite
LCA	Life-Cycle-Analysis			X	Lebenszyklusanalyse, dient zur Abschätzung der Umweltwirkungen der Untersuchungsgegenstände
MS	Mobile Station (Handy)			X	Mobilgerät
MSC	Mobile Switching Center		X		Vermittlungszentrale im GSM/UMTS-Netz
MSCS	Mobile Switching Center Server		X		MSC im UMTS-Netz
NMC	Network Management Center		X		Steuerungszentrale des Mobilfunknetzes, Teil des OMC
NOC	Network Operation Center		X		Anderer Begriff für NMC
Node B	Identisch zu RNS	X			Basisstation im UMTS-Netz
NSS	Network Switching Subsystem		X		Teilsystembezeichnung im Mobilfunknetz
OMC	Operation and Maintenance Center		X		Ebene des Mobilfunknetzes mit der Steuerung des Netzes
OMC-B	Operation and Maintenance Center – Base Station		X		Steuerung der Basisstationen durch das OMC
OMC-S	Operation and Maintenance Center – Switching Stations		X		Steuerung der Controller-Stationen durch das OMC
Racks	Bauelemente			X	Schränke für die Netztechnik
RNC	Radio Network Controller		X		Steuerung der UMTS-Basisstationen
RNS	Radio Network Subsystem	X			Basisstation im UMTS-Netz
SCP	Service Control Point			X	Center für Kundendienste (u.a. Freischaltung)
SGSN	Serving GPRS Support Nodes		X		Schnittstelle und Steuerung der Datendienste, Ein- und Ausbuchen der Teilnehmer
SOG	Service Order Gateway			X	Verbindung von Switching System und Administration (NMC)
TETRA	Terrestrial Trunked Radio			X	Mobilfunkstandard für unterschiedliche Dienste
TRAU	Transcoding and Rate Adaptation Unit	X			Umwandlung von 13kBit/s in 64 kBit/s, häufig in Vermittlungsstelle integriert
UMTS	Universal Mobile Telecommunication System			X	Mobilfunkstandard
VLR	Visitor Location Register		X		Datenbank für den Aufenthaltsort des Nutzers

Abstrakt: Infrastruktur des Mobilfunks

Die mobile Kommunikation ist aus unserem Leben nicht mehr wegzudenken. Vor der Jahrhundertwende war das Mobilfunknetz vor allem ein Telefonnetz. Heutzutage ist es ein leistungsfähiges Kommunikationsnetz, das Telefonie und Internet ermöglicht. Fast jeder Deutsche nutzt heutzutage den Mobilfunk. Steigende Bedarfe für noch schnellere Kommunikation führen dazu, dass das Mobilfunknetz immer weiter ausgebaut wird.

Doch welche Ressourcen wurden zum Aufbau der Netze benötigt? Wie hoch sind die jährlichen Stoffflüsse für die Instandhaltung? Welche Ressourcen werden für bundesweite Übertragungen mit hoher Bandbreite benötigt? Diese Fragen wurden vom IZT in einem Teilprojekt des Projektes „Materialeffizienz und Ressourcenschonung“ – gefördert vom BMU und koordiniert vom Wuppertal-Institut – geklärt. Die Untersuchung erbrachte folgende Ergebnisse:

- Es gibt eine Parallelität der Infrastrukturen mit funk- und kabelgebundenen Systemen. In diesen Systemen erfolgen zum Einen gleichartige Nutzungen (z.B. surfen über Mobilfunk oder über Kabel), zum Anderen sind sie mehrfach vorhanden (z.B. Telefonieren über GSM oder UMTS). Diese Parallelität führt zu einer Vervielfachung der Infrastrukturmasse.
- Es fehlt an aussagekräftigen Daten zur Infrastruktur des Mobilfunknetzes. Nur durch eine Vielzahl von Annahmen und Plausibilitätsbetrachtungen ließ sich die Größenordnung der Infrastruktur bestimmen.
- Die Primärinfrastruktur des Mobilfunks liegt in der Größenordnung von 100.000 bis 140.000 t. Hierbei wurde die Technik für die Funkzellen, die Steuerung der Funkzellen und die Netzwerkssteuerung betrachtet. Die sekundäre Infrastruktur (Kundenbetreuung, Verkaufsstellen, Logistik) wurde nicht einbezogen.
- Auch der jährliche Materialfluss für die Instandhaltung ist mit ca. 5.000 bis 12.000 t pro Jahr relativ gering. Zwischen 50 und 70 % dieses Stoffflusses wird durch konstruktive und elektronische Bestandteile bestimmt. Allerdings bestehen erhebliche Unsicherheiten in der Nutzungszeit der Infrastrukturbestandteile.
- Ein deutlicher Ausbau des schnellen UMTS-Netzes um ca. 40% (ca. 14.000 neue Basisstationen, 140 Controllerstationen sowie einigen neuen Steuerzentralen) könnte einen Stofffluss von 13.000 t induzieren.

Abstract: Infrastructure of Mobil Communication

Modern life is unthinkable without mobile communication. Before the turn of the 20th century the mobile network was mainly a telephone network. Today it is a high-capacity communication network allowing for mobile telephone networking and internet. Almost every German uses the mobile telephone system. New developments and demands will cause an expansion of the system.

However, which resources are required for network construction? What is the extent of the annual material flow for the maintenance of equipment? What resources are required for nationwide transmission with high bandwidth? IZT worked on these questions within the joint research project "Material Efficiency and Resource Protection" (MaRes, funded by the BMU Federal Ministry of Environment, co-ordinated by the Wuppertal-Institute). The research delivered the following results:

- There is a parallelism between infrastructure of wire-less and hard-wired cable systems. Also, in both systems occur similar utilizations (e.g. surfing via mobile service or cable network). The cable system is divided into a television system and a telecommunication system, but nowadays both are used for similar purposes (e.g. internet). The wire-less system is formed by a GSM and an UMTS-System which also doubles parts of the infrastructure.
- There is a significant lack of data about the mobile network infrastructure. The dimension of the existing infrastructure could be estimated only based on numerous assumptions and plausibility considerations.
- The primary infrastructure of the mobile telephone system has a weight of 100,000 to 140,000 t. This includes the infrastructure for cells, the control system and the network controlling system. The secondary infrastructure (customer support, selling points, logistics) was not considered.
- The annual material flow for maintenance is relatively low with around 5,000 to 12,000 t per year. Between 50 up to 70% of this material flow refer to constructive and electronic components. But significant uncertainties exist for the service life of infrastructure components.
- Upgrading the existing infrastructure for the fast UMTS network by around 40% (ca. 14,000 new base stations, 140 controller stations as well as some new control centers) could induce an additional material flow of about 13,000 t.

0 Kurzfassung

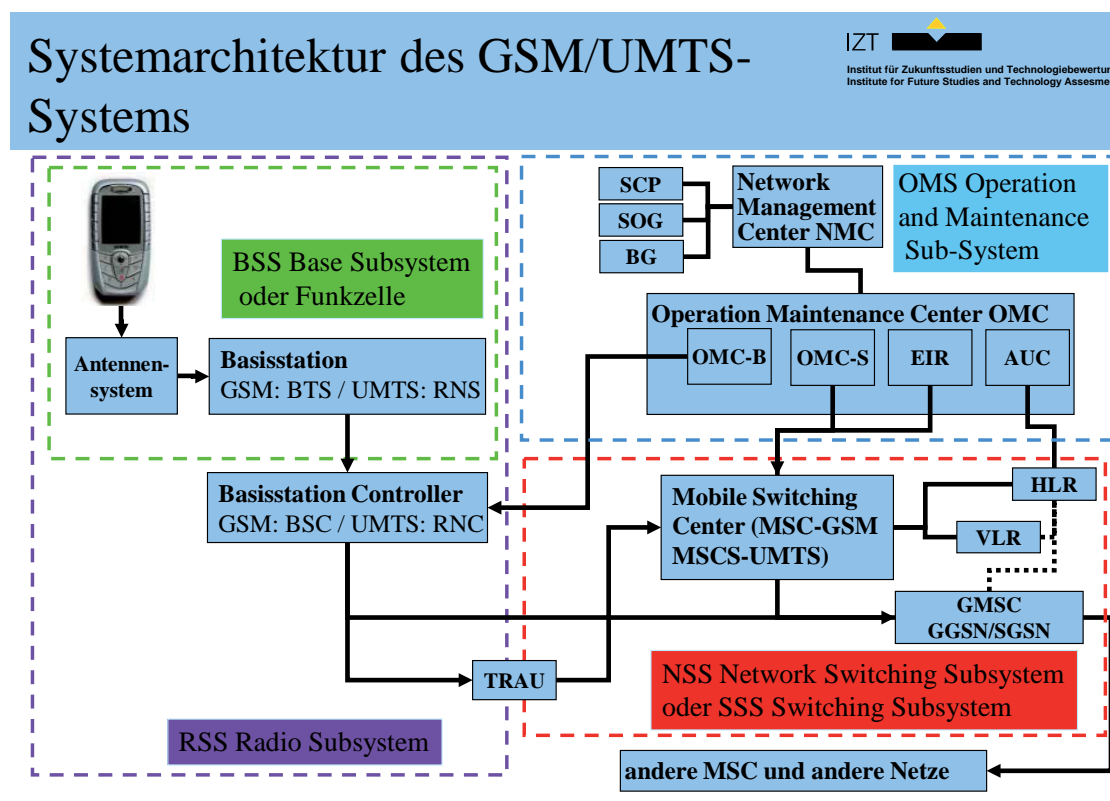
Im Arbeitspaket 2.3 des MaRes-Projektes (2007-2010) wurde der Ressourceneinsatz in wichtigen Infrastrukturbereichen untersucht. Das IZT unterstützte hierbei das Wuppertal-Institut durch seine Mitarbeit an der Untersuchung der Ressourcenintensität des Telekommunikationssektors. Hierbei bearbeitete das IZT den Mobilfunkbereich indem es eine Grundlagenuntersuchung zur Struktur des Mobilfunksektors durchführte. Darauf aufbauend wurde ansatzweise abgeschätzt, welche Ressourcen in der Infrastruktur vorkommen und welche Stoffflüsse durch die Mobilfunkinfrastruktur induziert werden.

Hinsichtlich des Ressourceneinsatzes ist der Telekommunikationssektor zunächst einmal durch eine Parallelität der Infrastrukturen gekennzeichnet. Man kann sowohl über den Festnetzanschluss telefonieren als auch über Mobilfunk. Man kann über den Mobilfunk, über Kabel- oder DSL-Anschluss surfen. Auf der einen Seite stehen deshalb die leitungsgebundenen Systeme mit Kupfer- und Glasfasernetzen, auf der anderen Seite stehen die vielfältigen Funknetze. Beide Systeme werden zunehmend für gleichartige Nutzungen (Internet, Fernsehen, Hörfunk, Telefonie) eingesetzt. Diese Aussage ist insofern relevant, als dies eine Vervielfachung der Infrastruktur bedeutet vor allem auf der Netzebene (Funknetze für Telefonie, Internet, Fernsehen und Hörfunk sowie Festnetze für die Telekommunikation, Internet und Kabel), aber auch auf der Ebene der Sendesysteme.

0.1 Architektur des Mobilfunksystems

Das Mobilfunksystem ist ein sehr komplexes technisches System, welches am besten durch seine vier Ebenen beschrieben wird. Diese vier Ebenen sind für die vier Netzbetreiber in Deutschland gleich. Die vier Ebenen sind das BSS Base Subsystem, das RSS Radio Subsystem, das NSS Network Switching System und das OMS Operation and Maintenance Sub-System.

Abbildung 1: Architektur des Mobilfunksystems



Im BSS ist die Basisstation das wesentliche technische Element. Basisstationen werden in Gebäuden untergebracht, benötigen zumeist nur einen Raum im Keller oder unter dem Dach. Sie können aber auch freistehend in einem kleinen Container untergebracht werden. Die Basisstation BTS¹ empfängt die eingehenden Nachrichten eines Mobiltelefons oder sendet übermittelte Nachrichten über eine Antenne an den jeweiligen Empfänger. Basisstationen bestehen zumeist aus Transceivern und Verstärkern (Vermittlungstechnik in sogenannten Racks), einer Kühlung, der Stromversorgung, dem Antennensystem mit einer Blitzschutzeinrichtung sowie der Verkabelung. Die Anzahl der Basisstationen beträgt mehrere tausend Einheiten pro Mobilfunknetz. Für das GSM-Netz dürfte die Anzahl zwischen 60.000 und 70.000 liegen und für das UMTS-Netz bei ca. 40.000. Die Stationen werden jedoch - wenn möglich - innerhalb eines Netzes und auch mit Netzen anderer Betreiber zusammengefasst um die Anzahl der Standorte zu minimieren.

Das RSS ist die nächste Ebene, die die Basisstationen miteinander durch die Basisstationen-Controller vernetzt. Diese sind wie schon zuvor die Vermittlungstechnik der Basisstationen eigentlich nur Transceiver, Verstärker und Steuerrechner zur Vermittlung der Gespräche und Steuerung des BS-Subsystems. Das Equipment des RSS ist zumeist in Basisstationen untergebracht. Neben den Racks der Vermittlungs- und Steuerungstechnik umfassen die Stationen des RSS noch häufig eine Notstromversorgung mit Batterien, Kühlanlagen, Anschlüsse an das Festnetz sowie oftmals auch Richtfunkverbindungen. Das RSS nutzt aber auch die technischen Systeme des BSS wie z.B. den Stromanschluss oder vorhandene Kühlanlagen. Die Anzahl der RSS-Stationen ist nur schwierig zu schätzen, da hierbei kaum Informationen vorliegen und die Stationen bis zu 500 Basisstationen miteinander vernetzen können. Im Rahmen dieser Studie wird die Anzahl der RSS-Stationen grob auf 900 bis 2.100 geschätzt

Das RSS (3. Ebene) ist an das Mobil Switching Center (MSC) angeschlossen. Dieser Vermittlungsknoten stellt die Verbindungen zwischen den Teilnehmern her und regelt auch Übergänge zu Partnernetzen sowohl für Mobil- als auch Festnetzgespräche. Am besten stellt man sich das MSC als Rechenzentren vor, das vor allem von Computertechnik geprägt sind. Hierdurch bedingt gibt es weiteres technisches Equipment wie eine aufwändige Kühltechnik, Feuerlöscheinrichtungen und Notstromversorgungen. In einem Mobilfunknetz gibt es nur wenige MSC. Die Anzahl der MSC für die vier Netze in Deutschland wird auf ca. 140 bis 200 geschätzt

Die vierte Ebene des Mobilfunksystems ist das Operation and Maintenance Sub-System (OMS). In dem OMS ist die zentrale Steuerung, Verwaltung und elektronische Kundenbetreuung eines Mobilfunknetzes angesiedelt. Ebenso liegen hier die Schnittstellen zu den anderen Telekommunikationssystemen wie dem Internet oder dem Festnetz. Durch die Nutzerverwaltung, die international zu einer Authentifizierung der Gesprächsteilnehmer verfügbar sein muss, gibt es hier auch die zentrale Datenbanksysteme der Netzbetreiber. Das OMS ist wie das MSC vergleichbar mit einem Rechenzentrum. Die Anzahl für die vier Netze in Deutschland wird auf 10 geschätzt.

0.2 Abschätzung der gebundenen Massen

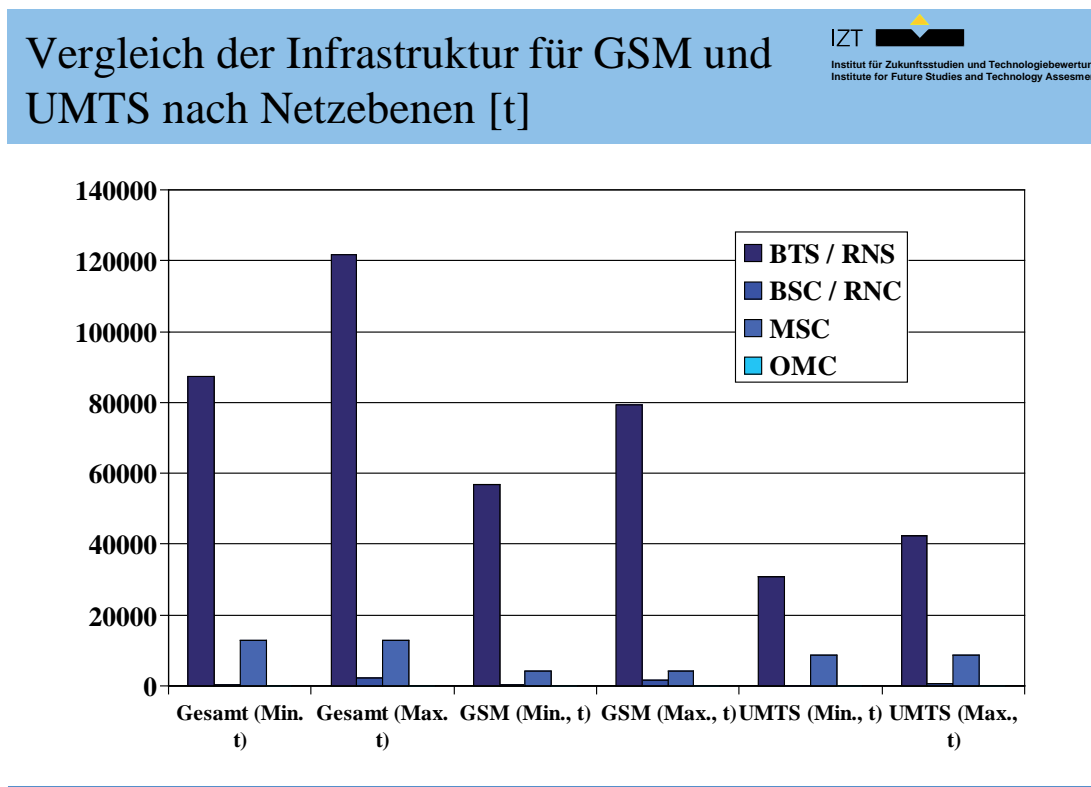
Die Abschätzung der Mengen und der Massen für die Infrastruktur ist auf eine Vielzahl von Annahmen und Plausibilitätsbetrachtungen aufgebaut, da es nur wenige Studien zur Thematik des Mobilfunks gibt. Selbst zentrale Basisdaten wie die Anzahl der Basisstationen sind nicht wissenschaftlich auswertbar bzw. verfügbar. Darüber hinaus sind kaum Informationen über die aktuell verwendete Technik – die einen erheblichen Einfluss auf die gebundenen Ressourcen hat – vorhanden, so dass Abschätzungen vorgenommen werden mussten und deshalb immer mit Minimal- und Maximalwerten für das GSM- und das UMTS-Netz gearbeitet wurde. Insgesamt wurde der Versuch unternommen, für das Mobilfunksystem die folgenden Bestandteile abzuschätzen:

¹ BTS = Base Transceiver Stations, im UMTS-System werden diese auch Radio-Network-System RNS genannt.

Tabelle 1: Systembestandteile der Bilanz.

BSS mit BTS und RNS	RSS mit BSC und RNC	NSS mit MSC	OSS mit OMC
Racks-Technik	Racks-Technik	Racks Gehäuse	Technik:
Racks-Gehäuse	Racks-Gehäuse	Kühlanlagen	Gateways /
Stromversorgung: DC-Stromversorgung, freistehende Stromverteiler, Stromverteiler in Gebäuden, Notstromversorgung	Stromversorgung: DC- und Notstromversorgung	Schnittstellen-systeme: GMSC, SGSN, GGSN, GGSN	Switches, Server, ACP, Dispatch-PC
Verkabelung: in Gebäuden, freistehend, Verkabelung für Richtfunk, und Stromanschluss, Kabelschienen, Verteilerstationen	Verkabelung	Datenbanksysteme: VLR, HLR, AuC, Ei	Racks Gehäuse
Antennen: GSM/UMTS sowie Richtfunkantennen jeweils mit RCU, CCU, Verstärker, Elektroinstallation und Befestigung	Kühlanlagen	weitere Systeme	
Container		Verkabelung	
Masten: auf Gebäuden, freistehend und als Anbau, Stahlrohr- und Gittermasten			
Blitzschutz: Ableitung, Halterung, Verkabelung, Elektroinstallation			
Kühlung: innen und außen			

Im Ergebnis zeigte sich, dass die Masse der in der Infrastruktur des Mobilfunksystems gebundenen Materialien in einem Rahmen von 100.000 bis 134.000 t liegen könnte, wobei sich die größten Massen in den Basisstationen befinden (zwischen 87.000 und 121.000 t) gefolgt mit weiten Abständen von der MSC (ca. 13.000 t). Die Controller-Stationen (BSC und RNC) mit 300 bis 2.300 t sowie die OMC mit etwa 40 t haben keine besondere Bedeutung. Aufgrund der Vielzahl der Annahmen und Abschätzungen sind diese Werte nur als große Richtwerte und Größenordnungen anzusehen.

Abbildung 2: Verteilung der Massen auf die einzelnen Ebenen des Mobilfunks.

Dr. Michael Scharp/MaRes

Quelle: Eigene Berechnung.

In einem weiteren Schritt wurde abgeschätzt, welche Anteile Elektronik (die eigentliche Vermittlungstechnik mit BTS/RNS, BSC/RNC, Antennen sowie MSC), Elektrik (Stromversorgung, Kühlanlagen), Kabel, Batterien sowie Konstruktionsmaterialien haben könnten. Hierbei zeigte sich, dass die Konstruktionsmaterialien den größten Anteil stellen dürften.

Tabelle 2: Massen unterschiedlicher Bestandteile eines Mobilfunksystems.

Gesamte Infrastruktur	Gesamt (t, unterer Wert)	Gesamt (t, oberer Wert)	GSM Min. [t]	GSM Max. [t]	UMTS Min. [t]	UMTS Max. [t]
Elektronik	12.700	14.800	6.900	8.100	5.800	6.700
Elektrik	10.600	12.400	6.400	7.500	4.200	4.900
Batterien	3.700	4.800	1.200	1.900	2.500	2.900
Kabel	18.800	32.600	11.800	20.800	7.000	11.800
Konstruktion	54.800	72.400	34.700	46.700	20.100	25.700
Summe	101.000	137.000	61.000	85.000	40.000	52.000

Quelle: Eigene Berechnung.

0.3 Ressourcenbilanz für ausgewählte Bauteilgruppen und Stoffe

Anschließend wurde der Versuch unternommen, Aussagen zur stofflichen Zusammensetzung von Bestandteilen des Mobilfunknetzes zu treffen. Im Ergebnis lassen sich nur sehr grobe Schätzungen über die Mengen einiger Stoffe machen. Die Aussagekraft ist sehr beschränkt, da zum einen die zugrundegelegten Stückzahlen sehr unsicher sind und zum anderen nur wenige Komponenten des Mobilfunksystems hinsichtlich ihrer stofflichen Zusammensetzung untersucht und die Ergebnisse in der Literatur dargestellt wurden.

Fasst man die Ergebnisse zusammen, so sollte der weitaus größte Anteil von schätzungsweise 53 % bzw. ca. 64.000 t durch Stahl abgedeckt werden. Dies ergibt sich vor allem aus den Mastkonstruktionen, Installationsmaterialien und den Rack-Gehäusen. An zweiter Stelle dürften Kupfer mit ca. 16.000 t bzw. 14 % stehen. Die Elektronik – die selbst nicht weiter aufgeschlüsselt werden konnte – steht mit ca. 9.000 t bzw. 8 % an dritter Stelle. Unter Sonstiges mit schätzungsweise 18.000 t bzw. 15 % wurden Blei (Notstromversorgung, Schätzung 3.000 t), Kunststoffe in Kabeln (Schätzung: 14.000 t) sowie Kühlmittel (Schätzung: 40 t) subsummiert. Diese Werte sind sehr grob geschätzt, geben aber zumindest Hinweise über einige Materialien. Die Werte für die Kunststoffe dürften noch deutlich höher liegen, da die Kunststoffe in der Elektronik oder als baukonstruktive Anteile nicht berücksichtigt wurden.

0.4 Ressourcenflüsse durch das Mobilfunksystem

Mobilfunk induziert wie jede andere Technik oder Dienstleistung Materialflüsse, da technische Geräte nur eine endliche Lebensdauer haben. Darüber hinaus gibt es jedoch vier spezifische Entwicklungen, durch die der Mobilfunksektor quasi „getrieben“ wird:

- Zum einen ist der Mobilfunksektor einem stetigen Prozess der technischen Weiterentwicklung und der Einführung neuer Technologien unterworfen, da er wie kaum ein anderer Sektor maßgeblich von der Computertechnik abhängig ist.
- Zum anderen führt die Weiterentwicklung der Nutzerbedarfe sowie die Entwicklung neuer Angebote für die Nutzer zu einem kontinuierlichen Prozess des Ausbaus der Mobilfunknetze und der anderen Telekommunikationsnetze, bei dem mehrere Systeme gleichzeitig mit unterschiedlichen Ausbaustandards „online“ sind.
- Weiterhin gibt es einen deutlichen Trend der Miniaturisierung und der Vereinheitlichung von Computertechnologien, so dass moderne BSC-Systeme sowohl GSM als auch UMTS gleichzeitig vermitteln können.
- Letztendlich führt der Bedarf nach immer höheren Übertragungsleistungen dazu, dass die Basisstationen, wie am Beispiel des UMTS-Systems zu sehen ist, immer dichter an den Endkunden heranrücken und die Anlagenanzahl aufgrund der notwendigen Mikrosysteme zunehmen wird.

Wie zuvor skizziert, mussten eine Vielzahl von Annahmen und Abschätzungen aufgrund von Plausibilitätsüberlegungen getroffen werden. Unter methodischen Aspekten wurden für die Bestand-

teile der Netzinfrastruktur zwischen der Lebens- und Nutzungsdauer unterschieden werden, da viele Bestandteile wie die Stromanschlüsse oder der Blitzschutz lebensdauerorientiert und die Elektronik nutzungsdauerorientiert betrachtet werden müssen. Nach diesen Überlegungen wurden zwei unterschiedliche „Szenarien“, ein „Steady-State-Szenario“ und ein „UMTS-Ausbauszenario 20XX“, betrachtet.

Das erste Szenario geht davon aus, dass kein Ausbau des Mobilfunknetzes erfolgt. In dem Steady-State-Szenario wurden unterschiedliche Zeiten der Verweildauer „Min“ und „Max“ für Systembestandteile angenommen. Diese liegen zwischen 2 Jahren z.B. für die Mobilfunkelektronik und 30 Jahren z.B. für Kabelschienen und Befestigungsmaterialien. Die folgende Tabelle zeigt die Ergebnisse der Abschätzung:

Tabelle 3: Jährliche Stoffflüsse durch unterschiedliche Bestandteile der Mobilfunkinfrastruktur (GSM und UMTS, gerundet).

Jährliche Stoffflüsse	Gesamt (t, unterer Wert)	Gesamt (t, oberer Wert)	GSM Min. [t]	GSM Max. [t]	UMTS Min. [t]	UMTS Max. [t]
Elektronik	2.000	5.500	1.100	3.100	900	2.400
Elektrik	500	900	300	500	200	400
Batterien	300	400	100	100	200	300
Kabel	600	1.600	400	1.000	200	600
Konstruktion	1.800	3.200	1.100	2.000	700	1.200
Summe	5.200	11.600	3.000	6.700	2.200	4.900

Im Ergebnis wird deutlich, dass der Materialfluss aufgrund der angenommenen Verweildauer zwischen 5.200 und 11.600 t pro Jahr liegen kann. Bei einer Schätzung der Masse der Mobilfunkinfrastruktur von ca. 101.000 t (unterer Wert) erfolgt ca. 70 % des jährlichen Stoffflusses durch konstruktive und elektronische Bestandteile. Nimmt man die höheren Schätzwerte der Mobilfunkinfrastrukturmasse mit ca. 137.000 t und legt die geringere Verweildauer der Bestandteile zugrunde, so dominiert der Austausch von Elektronik mit ca. 50 % gefolgt von konstruktiven Bestandteilen (vor allem Gehäuse) mit ca. 25 %.

Das zweite Szenario „UMTS 20XX“ geht davon aus, dass das UMTS-Netz zur besseren Netzabdeckung ausgebaut wird und die Anzahl der Basisstationen von ca. 36.000 auf 50.000 erweitert wird. Es wurde angenommen, dass alle Stationen neu gebaut werden, d.h. dass sie nicht in bestehende GSM-Stationen aufgenommen werden. Der Ausbau des UMTS-Systems führt in diesem Szenario nicht nur zur Erweiterung des Radio Subsystems, sondern es wurde auch angenommen, dass 14 MSC und 1 OMC neu errichtet werden. Im Unterschied zu den vorangegangenen Untersuchungen wurden keine Minimal- und Maximalwerte genutzt, da es nur um eine Vorstellung von Größenordnungen bei dieser Abschätzung geht.

Im Ergebnis zeigt sich, dass ein deutlicher Ausbau des UMTS-Netzes mit einem Stofffluss von ca. 13.000 t verbunden ist. Der Ausbau liegt somit deutlich über den geschätzten jährlichen Stoffflüssen auf Basis der Nutzungszeiten für die einzelnen Baugruppen des Mobilfunknetzes. Allerdings würde ein weiterer Ausbau nicht im bedeutenden Maße die Bestandsmassen erhöhen, sondern nur – wie in diesem Beispiel gezeigt – mit zusätzlichen Massen in der Größenordnung von 12 bis 17 % liegen. Einen wesentlichen Anteil an der Massenerhöhung hätten konstruktive Elemente mit ca. 50 % und ca. 25 % Kabelanteil. In der folgenden Tabelle sind die Ergebnisse noch einmal im Vergleich zum Bestand und zum Steady-State-Szenario dargestellt.

Tabelle 4: Infrastrukturmassen und jährliche Stoffflüsse von 2007/2008 im Vergleich mit dem Szenario UMTS-20XX [t]

	Bestand 2007/08 (unterer Wert)	Bestand 2007/08 (oberer Wert)	Jährliche Stoffflüsse ges. Infrastruktur (unterer Wert)	Jährliche Stoffflüsse ges. Infrastruktur (oberer Wert)	Szenario UMTS- 20XX
Elektronik	12.700	14.800	2.000	5.500	2.000
Elektrik	10.600	12.400	500	900	1.000
Batterien	3.700	4.800	300	400	1.400
Kabel	18.800	32.600	600	1.600	-
Konstruktion	54.800	72.400	1.800	3.200	8.300
Summe	101.000	137.000	5.200	11.600	13.000

0.5 Zusammenfassung

Die mobile Kommunikation ist aus unserem Leben nicht mehr wegzudenken. Vor der Jahrhundertwende im Jahre 2000 war das Mobilfunknetz vor allem ein Telefonnetz. Heutzutage ist es ein sehr leistungsfähiges Kommunikationsnetz, das Telefonie, Internet mit Webseiten und Mails sowie auch die Videokommunikation ermöglicht. Es wird nicht mehr lange dauern, bis es auch die Unterhaltungskommunikation wie z.B. das Fernsehen erreicht hat.

Eine Betrachtung der Funktionen der verschiedenen funk- und kabelgebundenen Systeme zeigt aber auch eine Parallelität der Infrastrukturen. Man kann sowohl über den Festnetzanschluss telefonieren als auch über Mobilfunk. Man kann über den Mobilfunk, über Kabel- oder DSL-Anschluss surfen. Es besteht somit eine Vervielfachung der Infrastruktur für gleichartige Zwecke. Auch innerhalb des Mobilfunksystems gibt es Verdoppelungen. Angefangen hat das mobile Telefonieren mit GSM, dem einfachen Funknetz. Die Bandbreite des Systems ist – aus heutiger Perspektive – so gering, dass Surfen im Web ein langwieriges Unterfangen ist. Zur Verbesserung der Bandbreite wurde UMTS etabliert, was nicht nur einen schnellen Zugang zum Internet sondern auch datenaufwändige Videokommunikation ermöglicht. Diese Parallelität führt dazu, dass beispielsweise zwei Empfangssysteme in den Funkzellen vorhanden sein müssen.

Eine Analyse der Ressourcenverwendung und der Ressourcenbedarfe des Mobilfunksystems orientiert sich am besten an den vier Ebenen des Mobilfunknetzes: Die erste Ebene ist das BSS Base Subsystem mit den eigentlichen Empfangs- und Sendesystemen, der BTS für das GSM-Netz und der RNS für das UMTS-System. Wesentliche Bauteile dieser Systeme sind die Vermittlungstechnik, Kühltechnik, Stromanschluss und Antennensysteme. Das BSS wird vom RSS Radio Subsystem (2. Ebene) überwacht und gesteuert. Die Systeme sind eigentlich nur die Controllerstationen (BSC für GSM und RNC für UMTS). Wesentliche Bauteile dieser Systeme sind die Vermittlungstechnik, häufig auch Richtfunktechnik sowie Notstromversorgung. Das RSS ist zumeist baulich in das BSS integriert. Die dritte Ebene ist das NSS Network Switching System, das das RSS vernetzt und auch die Anbindung an die anderen Netze (Festnetz und Internet sowie die anderen Funknetze) herstellt. Das NSS besteht vor allem aus zahlreichen MSC, die mit Rechenzentren vergleichbar sind. Neben der Vermittlungs-, Steuer- und Wartungstechnik, die im Prinzip vor allem Computer und Datenbanktechnik ist, finden sich hier vor allem zusätzliche Kühltechnik und Notstromversorgungen. Die MSC werden schließlich von dem OMS Operation and Maintenance Sub-System (4. Ebene) überwacht und gesteuert. Das OMS ist mit einem Rechenzentrum vergleichbar.

Auf Basis dieser Architektur lassen sich Schätzungen für die primäre Infrastruktur von Basisstationen, Controller-Stationen und Vermittlungsstationen treffen. Nicht erfasst wurden die sekundäre Infrastruktur (NMC mit Kundenbetreuung) sowie die Räumlichkeiten, die zur Bedienung des Geschäftsfeldes notwendig sind, wie auch Flächen und Räumlichkeiten zur Aufstellung der Infrastruktur. Bei der Abschätzung sind zudem folgende Unsicherheiten zu berücksichtigen:

- Nicht betrachtet wurde die sekundäre Infrastruktur wie z.B. Verkaufsstellen sowie Räumlichkeiten und bauliche Maßnahmen (Fundamente, Zäune) zur Aufstellung der Infrastruktur. Die Einbeziehung dieser Infrastruktur würde die Massenbilanzen mehr als nur verdoppeln.
- Die rasante technische Weiterentwicklung – wie z.B. duale Vermittlungstechnik sowohl für GSM als auch für UMTS – führt dazu, dass mit weniger Material die gleichen Funktionen übernommen werden.
- Auf allen Ebenen vom BSS hin zum NSS gibt es hinsichtlich der Anzahl der Stationen sowie auch hinsichtlich der Ausstattung der Stationen (z.B. mit Kühleinrichtungen oder Notstromversorgungen) hohe Unsicherheiten.
- Auch unzureichende Basisdaten über die Bauteilverwendung führen zu großen Unsicherheiten. Beispielsweise ist nicht bekannt, in welchem Umfange große Masten verwendet werden. Derartige Masten können die Massenbilanzen deutlich verändern.

Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass die Primärinfrastruktur mit 100.000 bis 140.000 t für die Mobilfunknetze im Vergleich zu anderen Infrastrukturen wie Gas, Wasser oder Elektrizität nicht besonders hoch sind. Bei diesen Infrastrukturen liegen die verbauten Massen im dreistelligen Millionen-Tonnen-Bereich. Auch der jährliche Materialfluss aufgrund der angenommenen Zeiten der Verweildauer ist mit ca. 5.000 bis 12.000 t pro Jahr relativ gering. Zwischen 50 und 70 % dieses Stoffflusses wird durch konstruktive und elektronische Bestandteile bestimmt. Bei einem deutlichen Ausbau des UMTS-Netzes um ca. 40% - d.h. durch die Schaffung von ca. 14.000 neuen Basisstationen, 140 Controllerstationen sowie einigen neuen MSC und OMC - könnte der induzierte Stofffluss in der Größenordnung von 13.000 t liegen. Der Ausbau liegt somit deutlich über den geschätzten jährlichen Stoffflüssen auf Basis der Nutzungszeiten für die einzelnen Baugruppen des Mobilfunknetzes. Allerdings würde ein weiterer Ausbau nicht im bedeutenden Maße die Bestandsmassen erhöhen, sondern nur – wie in diesem Beispiel gezeigt – mit zusätzlichen Massen in der Größenordnung von 12 bis 17 % liegen. Einen wesentlichen Anteil an der Massenerhöhung hätten konstruktive Elemente mit ca. 50 % und ca. 25 % Kabelanteil.

Vor diesem Hintergrund lassen sich folgende Ergebnisse hinsichtlich des Ressourceneinsatzes festhalten:

- Mobilfunk ist essentiell von der Computertechnik abhängig und die Nutzung der besten Technologien ist sehr wettbewerbsrelevant. Es ist anzunehmen – und es wird auch von Mobilfunkexperten bestätigt – dass die Computertechnik bedarfsorientiert und nicht lebensdauerorientiert genutzt wird. Die Elektronik ist somit ein relevanter Faktor bei den jährlichen Stoffflüssen.
- Es gibt einen kontinuierlichen Ausbau der Netze hin zu höheren Mobilfunk-Standards, so dass mehrere Netze parallel existieren. Noch immer erfolgt der Ausbau des UMTS-Netzes, da dies bisher insbesondere in den ländlichen Regionen nicht verfügbar ist. Dies führt zunächst zu einer Erhöhung der jährlichen Stoffflüsse und einer Steigerung der Infrastrukturmasse. Allerdings ist diese zusätzliche Masse in Bezug auf die vorhandenen Infrastrukturen im Mobilfunk relativ gering.
- Es gibt weiterhin einen Trend zur Miniaturisierung und zur Technikintegration (duale Verarbeitung von GSM und UMTS vor allem in der Vermittlungstechnik), der zu einer Reduzierung der Infrastrukturmasse führt. Da die Vermittlungstechnik jedoch nur 10 bis 13 % der Gesamtinfrastruktur darstellt, wird das Reduktionspotential jedoch nicht wirklich groß sein.
- Das Kosumverhalten der Kunden der Mobilfunkanbieter induziert vergleichbar hohe Ressourcenströme wie durch die Wartung oder den Ausbau des Netzes selbst erfolgen. In Deutschland gab es in 2008 ca. 107 Mio. Anschlüsse. Bei einem geschätzten Gewicht von 150 g pro Geräte – inklusive Ladegerät – ergäbe sich eine Masse der Handys von ca. 16.000 t. Nimmt man eine Nutzungsdauer von 2 Jahren an, so ergäbe sich ein Ressourcenfluss von ca. 8.000 t allein aufgrund des Austausches von Mobiltelefonen.

1 Anwendungen von IuK-Systemen

Informations- und Kommunikationssysteme können sich auf unterschiedliche Nutzungen beziehen und haben bis in die 80iger-Jahre noch unterschiedliche Infrastrukturen verwendet. Je nach Anwendungsfeld haben sich unterschiedliche Systeme herausgebildet, die sich in den letzten Dekaden jedoch zunehmend überschneiden. Zur einfachen Strukturierung kann man die IuK-Systeme wie folgt gliedern:

Tabelle 5: Nutzungsarten und Systeme in den IuK-Systemen.

Nutzung	Systeme
Telephonie	Festnetz, Mobilfunk, Internet, Satelliten
Fernsehen	Analoges Antennenfernsehen, Kabelfernsehen, Satellitenfernsehen, Digitales terrestrisches Fernsehen, Internet
Hörfunk ²	Analoger Antennenrundfunk, Kabelrundfunk, Satellitenhörfunk, digitaler terrestrischer Hörfunk, Internet
Information und Datenübertragung	Internet, WLAN, Festnetz, Mobilfunk
Navigation	Satellitensysteme

Quelle: Eigene Darstellung.

Die Entwicklung der IuK-Technologien seit den fünfziger Jahren lässt sich vereinfacht in einigen Stufen nachzeichnen (vgl. Wersig 2000), die auch den Rahmen zur Beschreibung der Systemgrenzen abgeben können. In den fünfziger Jahren erfolgte der Ausbau der seit den zwanziger Jahren des 19. Jahrhunderts bekannten Medien wie Fernsehen, Rundfunk und netzgebundene Telephonie auf einer analogen Basis hin zu Massenmedien. Gleichfalls wurde in den fünfziger Jahren die zweite Generation der Computer mit digitalen Verarbeitungskonzepten entwickelt. Auf dieser Stufe dienten sie in ihren Anwendungen vor allem zur Verbesserung der Effizienz von Produktions- und Arbeitsabläufen im gewerblichen Bereich und durchdrangen den Markt nur beschränkt mit geringen Stückzahlen. In den sechziger Jahren gab es auch in den USA die ersten kleinen „Netze“ von Militär und Forschungseinrichtungen (Arpanet) zum Datenaustausch mittels Computern. Der Einzug der analogen Produkte Fernsehen und Telephonie in die Haushalte führte jedoch zu einem ersten Massenmarkt für IuK-Produkte. Nachdem die vielfältigen Optionen der digitalen Datenverarbeitung durch die Entwicklung von integrierten Schaltkreisen (ICs) und verbesserter Software in den sechziger und siebziger Jahren immer deutlicher wurden, zogen auch diese in die Haushalte und Verwaltungen ein. Mit steigendem Absatz wurden die Produkte zunehmend preiswerter, was wiederum den Absatz steigerte. Gleichfalls wurde in den achtziger Jahren das bis dahin entwickelte Autotelefonnetz hin zu analogen zellulären Netzen weiterentwickelt. Auch hier tat sich mit der Freigabe von Rundfunkfrequenzen und der Etablierung von neuen Unternehmen ein wahrer Massenmarkt in den neunziger Jahren auf, als sich die Digitalisierung des Mobilfunks – die ohne Computertechnologie nicht möglich gewesen wäre – durchsetzte. Parallel dazu wurde die digitale Festnetztelephonie entwickelt mit dem ISDN. In diese Zeit fiel auch die Einführung des Satellitenfernsehens, welches gleichfalls digital arbeitet. Ein weiterer Schritt war das Angebot des CERN mit dem World Wide Web Anfang der neunziger Jahre, das allen Computernutzern, die über eine Telefonleitung verfügten, einen weltweiten Datenaustausch ermöglichte. Ein weiterer Schritt der Digitalisierung, der derzeit umgesetzt wird, ist die Einführung des digitalen terrestrischen Rundfunks. Mit der Fülle der Infrastrukturen, die unterschiedlichen Zwecken dienten, begann aber auch ein Prozess der Konvergenz, bei dem ähnliche Inhalte in den einzelnen IuK-Systemen sich gleichmäßig verbreiteten. Das Telefon diente als Zugang zum Internet und das Internet ermöglichte eine neue Form des Telefonierens. Im Folgenden werden die wesentlichen Nutzungsarten der IuK-Systeme erläutert.

² Mit Rundfunk werden i.A. Hörfunk und Fernsehen bezeichnet.

1.1 Vom Kupfer zum Funk und zur Glasfaser

Traditionell wurde Kupfer als Medium der Telekommunikation seit der Erfindung des Telefons eingesetzt. Auch neue Medien wie das Fernsehen griffen später auf (Kupfer-)Kabelsysteme zurück, um mehr Programme zu übertragen als mit dem terrestrischen Antennenfernsehen. Auf dieser Grundlage wurden ganze Kontinente mit Kupferleitungen durchzogen und auch die alten Unterseekabel zwischen den Kontinenten waren früher Kupferkabel. Bis in die achtziger Jahre war das Kupferkabel dominierend in der Kommunikation in Gebäuden, zwischen Orten und im Fernverkehr. Mit der Anforderung nach höheren Datenübertragungsraten wurden jedoch neue Übertragungssysteme gesucht und mit der Glasfasertechnologie und der Übertragung der seit langem bekannten Funktechnologie auf neue Alltagsnutzungen auch gefunden.

Kupferleitungen werden auch heute noch vor allem auf der sogenannten „letzten Meile“ verwendet, d.h. dem Anschluss von Gebäuden an das Festnetz bzw. an die Vermittlungsstellen. In der Telekommunikation (Telefonie, Internet) und bei dem Kabelanschluss (Fernsehen) ist dies zum einen Tradition der Anbieter, zum anderen ist die Glasfasertechnologie kostenaufwendiger im Anschluss aufgrund der notwendigen optischen Systeme. Auch in der internen Gebäudeverkabelung für die Telekommunikation, für TV und für Computernetze werden üblicherweise Kupferleitungen verwendet.

Die Datenübertragung in Glasfasern zeichnet sich durch andere Prinzipien aus als bei der Nutzung von Kupferleitungen. Während in Kupferleitungen elektrische Impulse verwendet werden, sind dies in Glasfaserleitungen Lichtwellen. Computer verwenden für ihre Rechenarbeiten üblicherweise elektrische Signale, so dass eine Kommunikation über Glasfaser die Umwandlung von elektrischen in optische Signale durch Optoelektronik erfordert. Wesentlich ist der Unterschied in der Breitbandigkeit³ von Glasfasern, da hierbei Lichtwellen unterschiedlicher Frequenzen gleichzeitig in der Faser übertragen werden können sowie die geringe Dämpfung, so dass Signale bis zu 100 km weit reichen.⁴ Vor allem aus diesem Grunde haben sich optische Nachrichtenkanäle insbesondere im Fernverkehr (Transkontinental, Städteverbindungen) und auch im Ortsverkehr zwischen den Vermittlungsstellen durchgesetzt (DKI 2000:17). Weitere Vorteile der Glasfasern sind die Unempfindlichkeit gegen elektromagnetische Beeinflussung sowie die Potentialfreiheit (da ja keine Ströme übertragen werden). Auf der letzten Meile und auch bei der Ausbildung von LAN's (z.B. Computernetze in Firmen) werden aber nach wie vor überwiegend Kupferkabel verwendet. Dies ergibt sich durch die Vermeidung des Einsatzes von Optoelektronik (Kostenargument) als auch durch die deutlich einfacheren Anschlussmöglichkeiten von Kupferkabeln (Verbindung von Kupferkabeln mit einem Kupfernetz im Haus). Neue Übertragungstechnologien für Kupferleitungen, die auf modifizierten Signalverfahren bei Ausnutzung unterschiedlicher Frequenzbänder beruhen, ermöglichen auch in den konventionellen Telefonleitungen höhere Übertragungsraten. Mit ADSL, HDSL oder in Verbindung mit Lichtwellenleitern in VDSL können im klassischen Telefonkabelnetz durchaus sehr hohe Übertragungsraten erreicht werden, auch wenn die theoretischen maximalen Grenzen real zumeist nicht angeboten werden. Beispielsweise bietet die Telekom VDSL mit bis zu 16 Mbit/s an (Telekom 2006:32), das Verfahren ermöglicht jedoch Übertragungsraten bis zu 72 Mbit/s (IT Wissen o.J.: VDSL).

Eine besondere Herausforderung stellt jedoch die „letzte Meile“ der Hausanschlüsse dar, da über die vorhandenen Festnetzanschlüsse sowohl Telefon- als auch Internetverkehr abgewickelt werden. Heutigen Anforderungen genügen zumeist ISDN und DSL-Anschlüssen⁵, weshalb die „letzte Meile“

³ Unter Bandbreite versteht man einen Frequenzbereich (obere und untere Frequenz), in dem elektrische Signale mit einem Amplitudenabfall von bis zu 3 dB übertragen werden. Die (maximale) Übertragungsrate bzw. Übertragungsgeschwindigkeit pro Zeiteinheit ist von der Bandbreite abhängig. Die maximale Bandbreiten-Ausnutzung beträgt für binäre Signale 2 Bit pro Hertz Bandbreite (IT Wissen o.J.: Bandbreite).

⁴ Bei gleicher Übertragungsrate vermögen Kupferleitungen nur 1 bis 2 km weit zu übertragen. Vgl. IT Wissen o.J.: Glasfaser sowie IT Wissen o.J.: Wellenlängenmultiplex.

⁵ DSL kann von den Anbietern mit unterschiedlichen Übertragungsraten von 256 kBit/s bis 8 Mbit/s angeboten werden (tns Infratec 2006:278).

fast nur kabelgestützt ist. Die Übertragung von größeren Datenmengen z.B. beim Download von Filmen ist aber auch mit DSL sehr zeitaufwendig. Neue Funktechnologien wie WiMAX – eine Weiterentwicklung der WLAN Technologie – oder HSDPA – eine Technologie auf UMTS-Basis – können helfen, einen noch breitbandigeren Anschluss ohne Kabel bereitzustellen (tns-Infratest 2006:247). Mit einer Datenübertragungsrate von bis zu 70 Mbit/s übertrifft WiMAX, welches in Berlin Pankow zur Zeit getestet wird, sogar ADSL-Anschlüsse um den Faktor 23. HSDPA vermag zwar nur Übertragungsraten in der praktischen Umsetzung derzeit von 14 Mbit/s zu erzielen, liegt aber deutlich über der Leistung von ADSL.

Durch diese neuen Modulationsverfahren kommt auch eine weitere klassische Anwendung – das HF-Koaxialkabel für Fernsehsignale – sowohl unter Druck als auch zu einer neuen Renaissance. Einerseits können über ADSL-Verbindungen Spielfilme auf den PC via Internet in einer annehmbaren Zeit übertragen werden, andererseits bieten aber die frequenzmodulierten Verfahren in den Kabelnetzen gleichfalls höhere Übertragungsraten und Decoder-Technologien auch noch eine Rückkanalfähigkeit.

Eine weitere Alternative zur Datenübertragung mittels Kupferkabel ist die kabellose Datenübertragung (wireless communication), die eigentlich die klassische Funktechnologie ist. Mit der Nutzung neuer Frequenzbänder wurde ein breites Spektrum an Möglichkeiten erschlossen. Hierbei können vier Möglichkeiten unterschieden werden (Hilty et al 2003:49):

- WANs (Wide Area Networks), Distanz bis zu 100 km, Nutzung vor allem für Mobilfunknetze;
- WLANs (Wireless Local Area Networks), Reichweite zumeist im Bereich von 100 m, Nutzung vor allem zur Vernetzung von Bürogebäuden, Wohnhäusern und sogenannte Hot Spots auf Flughäfen, Hotels und Einkaufszonen;
- WPANs (Wireless Personal Area Networks), Reichweite um die 10 m, Nutzung vor allem für portable Geräte und "Wearables"⁶ sowie
- BANs (Body Area Networks), Reichweite von 1 m, Nutzung für am Körper zu tragende Komponenten.

Charakteristisch für die Netze ist, dass die Geräte zumeist über sogenannte Basisstationen kommunizieren. Beispielsweise werden mit GPS-Empfängern oder mit Handys immer zentrale Basisstationen in einer Funkzelle angesteuert, über die auch die Kommunikation mit anderen Geräten verläuft. Hierdurch wird zwar eine Kabellosigkeit bis auf die Stromversorgung der Basisstationen sichergestellt, aber zusätzliche kupferbasierte Infrastruktur benötigt. Nur im unmittelbaren Nahbereich kommunizieren die Geräte miteinander und benötigen zumeist nur kleine Zusatzgeräte bzw. sind mit dieser Technologie ausgestattet (z.B. IR-Schnittstelle im Handy oder Bluetooth-Technologie).

1.2 Satellitensysteme

Satelliten-Kommunikation

Die Satellitenkommunikation kombiniert im Unterschied zum Satellitenfernsehen die bestehenden Kommunikationsinfrastrukturen mit der Satellitentechnologie. Die von den Nutzern über die nationalen Infrastrukturen (z.B. Festnetz, terrestrisches Funknetz, Kabelnetze) gesendeten Informationen werden über einen Provider mit Sendeantennen an einen Satelliten weitergeleitet, der sie wiederum zu den Empfangsstationen des oder eines anderen Providers weiterleitet. Von hier werden die Signale an die Empfänger mit den bestehenden landgestützten Infrastrukturen weitergeleitet. Eine Ausnahme ist die Satelliten-Telephonie, die bidirektional zwischen den Nutzern direkt über den Satelliten geht. Zu diesem Zweck wurde Ende der 90iger-Jahre das Iridium-Satellitensystem von privaten Investoren angeschoben. Aufgrund der hohen Kosten für Satellitensysteme ist die Anwendung jedoch nur gering. Eine weitere Ausnahme ist z.B. das Sky-DSL der Telekom, welches für Gebiete genutzt wird, die

⁶ Unter Wearables versteht man im Allgemeinen am Körper zu tragende IuK-Geräte.

wegen der Kosten nicht mit DSL versorgt werden können. Hierbei wird z.B. ein Internetzugang ermöglicht, der über das bestehende regionale Netz direkt einen Satellitenzugang ermöglicht.

Satelliten-Navigation

Ein neuerer Trend in den Informations- und Kommunikationstechnologien ist das Global Positioning bzw. die Satelliten Navigation. Hierbei ist es möglich, den Standort eines Nutzers genau zu bestimmen und diesen mit einer Satelliten-Navigation zu einem gewünschten Ziel zu führen. Die Satelliten-Navigation wurde ursprünglich Ende der 80iger-Jahre installiert und zunächst militärisch genutzt von den USA mit dem GPS-System. Sie wurde aber schnell auch zivil vor allem für die Schiff- und Luftfahrt genutzt. In neuerer Zeit kamen zunächst die landgestützte Logistik (LKW-Fernverkehr), der private Autoverkehr (Navigationsgeräte) und heutzutage die Handy-gestützte Navigation (Wanderführer und städtisches Sightseeing) hinzu. Gewerblich ist es vor allem für die Vermessung und darauf basierende Bereiche (Stadtplanung, Bauwesen, Straßen- und Schienenbau etc.) von großer Bedeutung. Auch das deutsche Autobahn-Maut-System nutzt das GPS-System zur Nutzungskontrolle. Satelliten-Navigation basiert auf einem Satellitennetz, welches die Positionssignale der Satelliten und die exakte Uhrzeit ausstrahlen. Aus der Signallaufzeit können Signalempfänger dann die eigene Uhrzeit, die genaue Position, die eigene Geschwindigkeit und die Bewegungsrichtung errechnen. Die Europäische Union hat ebenfalls beschlossen, ein Galileo-Satellitensystem 2013 im Weltraum zu installieren. Ebenso planen Chinesen und Russen ein GLONASS und COMPASS-Satellitensystem.

Informations- und Kommunikationssatelliten⁷

Die wichtigsten Fernsehsatelliten-Systeme sind für Deutschland Astra und Eutelsat, die als geostationäre Satelliten positioniert sind. Das Astrasystem umfasst 15 Satelliten⁸, das Eutelsat-System 15 Satelliten. Eine Zuordnung der Satelliten speziell zu Deutschland ist nicht zu treffen, da sie vor allem Europäisch ausgerichtet sind:

Tabelle 6: Europäische Satelliten.

Satellite	Start	Footprint	Lebensdauer	Nutzungsende
Astra 1f	1995	Europa (ohne Südosteuropa)	14 Jahre	2009
Astra 1h	1997	Europa (ohne Südosteuropa)	15 Jahre	2012
Astra 1g	1999	Europa (ohne Südosteuropa)	15 Jahre	2014
Astra 1KR	2006	Europa (ohne Südosteuropa)		
Astra 1L	2007	Europa (ohne Südosteuropa)		
Astra 2A	1998	Europa (ohne Südosteuropa)	15 Jahre	2013
Astra 2B	2000	Europa (ohne Südosteuropa)	15 Jahre	2015
Astra 2C	2000	Europa (ohne Südosteuropa)	15 Jahre	2015
Astra 2D	2000	Groß Brittanien und Irland	12 Jahre	2012
Astra 3A	2002	Deutschland und tlw. angrenzende Länder	10 Jahre	2012
Sirius 2	1997	Europa (Beam 1) und Skandinavische Länder (Beam 2)	15 Jahre	2012
Sirius 3	1998	Skandinavische und Baltische Länder, Dänemark, Polen und tlw. Deutschland	12 Jahre	2010
Sirius 4	2007	Europa und tlw. Russland		

Quelle: Astra.

Die Lebensdauer der Astra-Satelliten wird mit 12 bis 15 Jahre angegeben.⁹ Wie aus obiger Tabelle ersichtlich ist, müssen zwischen 2009 und 2015 die meisten Satelliten ersetzt werden. Dies bedeutet

⁷ Viele Fernsehsatelliten übertragen auch Hörfunk und werden für Datenübertragung genutzt, weshalb sie hier zusammengefasst dargestellt werden.

⁸ 3 Astra-Satelliten und 2 Eutelsat-Satelliten sind nicht mehr in Betrieb. S.a. <http://www.ses-astra.com/business/de/satellite-fleet/index.php>.

⁹ Online: <http://www.ses-astra.com/business/de/satellite-fleet/satellite-list>. Zugriff: Juni 2008.

aber nicht, dass im gleichen Umfange neue Satelliten in den Orbit geschossen werden müssen, da auch die Übertragungstechnologien effizienter werden.

Navigationssatelliten-Systeme

Das Galileo-System soll mit 30 Satelliten ausgestattet werden (gallileo-navigationssystem.com, o.J.), das GPS-System verfügt über 24 Satelliten. Die Anzahl der tatsächlich benötigten Satelliten ist geringer, aber aufgrund der Unmöglichkeit der Reparatur und der langen Dauer, beim Ausfall Ersatz in den Orbit zu schaffen, sind Satelliten-Systeme redundant ausgelegt. Die Lebenserwartung der Satelliten beim Galileo-System soll 10 bis 12 Jahre betragen (Fasse 2008:11).

Wesentliche Infrastrukturbestandteile eines Satelliten-Systems sind die Satelliten selbst sowie die Bahnverfolgungsstationen (Bodenstationen) der Systeme. Hinsichtlich ihrer Materialbilanzierung müssen jedoch auch die Raketen und die Raketenabschussbasen – für Galileo das Raumfahrtzentrum Kouruo in Französisch-Guayana – hinzugerechnet werden ohne die ein Satellitenstart nicht möglich ist.

1.3 Festnetz

Das klassische analoge Festnetz war bis weit in die achtziger Jahre hinein das Telefonnetz, welches ursprünglich von der Deutschen Post und später von der Telekom errichtet wurde. Sein Hauptzweck war die sogenannte Festnetz-Kommunikation, d.h. das Telefonieren von stationärem Endgerät zu stationärem Endgerät und seit den sechziger Jahren auch das Faxen von Informationen. Mit zunehmender Digitalisierung der Übertragungsverfahren, Verwendung von mehreren Rufnummern je Haushalt und Erhöhung der Bandbreiten der Kommunikation zeigte sich, dass auch das Festnetz in seiner herkömmlichen Form – zweiadrigter Anschluss der Festnetzanschlüsse – durchaus für andere Zwecke nutzbar war. Mit der Einführung von Modems¹⁰ ist es möglich gewesen, die Computerkommunikation (Internet) über das Festnetz abzuwickeln. Die Festnetztelephonie steht in unmittelbarer Konkurrenz zum Mobilfunk und zum Internet, welches zunehmend Bedeutung für Telefongespräche gewinnt.

Die Infrastrukturbestandteile des Festnetzes umfassen das Fern- und Regionalnetz, das Anschlussnetz („letzte Meile“ zum Hausanschluss) und die Vermittlungsstellen auf unterschiedlichen Ebenen. Im Fern- und Regionalnetz werden sowohl Kupferkabel als auch vermehrt Glasfaserkabel eingesetzt, im Anschlussnetz gibt es nur in einigen Pilotregionen Glasfaseranschlüsse.¹¹

Quantitative Aussagen über die Nutzung von Kupfer für die Telekommunikationsnetze sind nur für die Schweiz gut abgeschätzt. Wittmer schätzt auf Basis verschiedener Annahmen, dass die Lagermenge ca. 117.000 t für Fernmeldekabel und Koaxialkabel beträgt (Wittmer 2006:51 und 84). Pro Einwohner werden somit 16 kg Kupfer für die Telekommunikation genutzt. Wesentlich größere Mengen – mehr als 600.000 t – werden im Stromnetz genutzt (ebd.:85). Überträgt man die von Wittmer gefundenen Werte hinsichtlich des Pro-Kopf-Anteils von Kupfer (16 kg pro Einwohner für das Festnetz, ebd.:85) auf Deutschland, so erhält man eine Kupfermasse von ca. 1,3 Mio. t. Nicht erfasst ist hierbei die Infrastruktur der Netze (Netzvermittlungsstellen, Schaltkästen etc.).

Das Netz der Deutschen Telekom umfasste 1998 nach Behrendt ca. 169.000 km Kupferleitungen und 300.000 km Glasfaserleitungen (Behrendt 1998 S:65). Der Kupfergehalt allein des Netzes – ohne die Infrastruktur – wurde von Behrendt auf ca. 300.000 t geschätzt. Im Jahre 2001 wurden jedoch die Netzkennzahlen von der Telekom aktualisiert. Für das Jahr 2005 nennt die Telekom deshalb ein

¹⁰ Modem = Modulator und Demodulator. Ein Gerät, welches digitale Daten in analoge Daten und wieder zurück umwandelt. Mit einem Modem ist es möglich, digitale Informationen in das analoge Telefonnetz zu übertragen.

¹¹ In den neunziger Jahren wurden versuchsweise Glasfaseranschlüsse als Hausanschlüsse in einigen Pilotgebieten verlegt. Da es jedoch nicht möglich war, einen schnellen Internetzugang wie DSL über Glasfaser anzubieten, wurden beispielsweise in Kleinmachnow in der Siedlung Stolper Weg nachträglich in den letzten Jahren auch noch ISDN-Anschlüsse auf Kupferbasis verlegt.

Kupfernetz von ca. 1,48 Mio. km und ein Glasfasernetz von 206.300 km (Telekom 2006). Allerdings macht die Telekom hierbei keine Angabe hinsichtlich der Masse an Kupfer. Würde man die spezifischen Werte von Behrendt (1,775 t/km) auf die Leitungslängen der Telekom von 2005 übertragen, so erhielte man eine Kupfermasse von 2,63 Mio. t Kupfer.

Zum Aufbau eines Kabelnetzes für die Telekommunikation mit ca. 50 Millionen Festnetzanschlüssen¹² (Stand: 2005, Telekom o.J.) hatte die Telekom ein Netz mit einer Länge von ca. 1,8 Mio. km (Stand: 2005) aufgebaut, welches zu 7/8ten auf Kupfer basierte.

1.4 Internet

Aus einer einfachen Kommunikationsverbindung zwischen Forschungsinstitutionen hat das CERN 1992 das öffentliche World Wide Web entwickelt (Wersig 2000:187).¹³ Was ursprünglich nur der Vernetzung von (leistungsschwachen) Rechnern gedient hatte, entwickelte sich zum dritten Massenkommunikationsmedium.¹⁴ Die steigende Bedeutung des Internets geht mit einer zunehmenden Verbreitung von Computern in Haushalten einher. Die zunächst wichtigste Applikation war die E-mail, später folgten dann nach der Entwicklung von Browsern und einfachen Programmen zur Erstellung von Webseiten eine umfassende Informationsbereitstellung und deren Nutzung im Internet. Neuere Trends sind der Chat im Internet sowie die Präsentation von Personenprofilen auf speziellen Kommunikationsplattformen. Mit der Einführung weitergehender Angebote, die auch bidirektional ausgelegt sind, findet das Internet immer mehr Verbreitung und wird auch kommerziell in umfassender Weise genutzt.

Die Nutzung des Internets basierte zunächst auf den einfachen Telefonleitungen und Modems, mit denen digitale Signale der Computer für die Übertragung analogisiert wurden um sie anschließend wieder zurückzuwandeln. Hierdurch waren nur geringe Bandbreiten und Übertragungsraten möglich, die schnell die Zugänglichkeit begrenzten. Mit der Einführung des digitalen ISDN's und später neuer Protokolle wie z.B. DSL und seiner Weiterentwicklungen wurde diese „Analogschwachstelle“ behoben. Zudem wurden für den regionalen, nationalen und internationalen Datenverkehr zunehmend Glasfasernetze sowohl kontinental als auch für Seekabel verwendet. Der opto-elektronische Datentransfer zeichnet sich gegenüber dem digitalen Datenverkehr mit Kupferkabeln durch wesentlich höhere Bandbreiten und höherer Geschwindigkeiten aus. Teilweise werden heutzutage auch Satellitenübertragungen für die Datenübertragung eingesetzt, die jedoch relativ teuer sind. Im Ergebnis ist ein weltumspannendes Leitungsnetz aus Kupferkabeln und Glasfasern entstanden, welches die zahlreichen nationalen und regionalen Netze miteinander verbinden. Die Verbindung wird durch sogenannte Internet-Knoten – sehr leistungsstarken Rechenzentren – hergestellt, die direkt miteinander verbunden sind. Es gibt im Internet somit keine Zentrale, die das ganze System steuert, sondern nur eine Vielzahl von Zentralen, die kleinere Netze steuern.

Der wesentliche Infrastrukturbestandteil des Internets ist das kabelgestützte Telekommunikationsnetz, auf welchem sowohl der Datentransfer als auch die Telefongespräche laufen. Im Anschlussnetz basiert dies auf Kupferleitungen (ISDN-System), im Fern- und Regionalnetz auf Glasfaser und Kupferleitungen. Dazu gehören zur Infrastruktur aber auch noch die Netzknoten. Diese sind eigentlich Rechenzentren, die den Datenverkehr steuern. In Deutschland ist der zentrale Netzknoten DE-CIX in Frankfurt. Dazu kommen noch regionale Netzknoten¹⁵ in Berlin (2), Düsseldorf, Hamburg (3), Essen, Frankfurt am Main (3), Leipzig, München, Münster, Nürnberg und Stuttgart.

¹² Hierbei ist die Anzahl der Analogkanäle identisch mit den Telefon-Kanälen, wohingegen bei ISDN zwei Kanäle und bei ISDN-Primärmultiplex 30 Kanäle vorliegen. Insgesamt gab es 8,5 Mio. Breitbandanschlüsse und 41,2 Mio. Standardanschlüsse mit ca. 55 Mio. Telefonkanälen.

¹³ Vorläufer war ein militärisches Projekt „Arpanet“ des US-Militärs.

¹⁴ Alternativ kann auch der Mobilfunk als drittes Massenkommunikationsmedium bezeichnet werden.

¹⁵ In manchen Städten gibt es mehrere regionale Netzknoten.

Weltweit gab es in 2006 jedoch schon ca. 1,2 Mrd. berufliche oder private Nutzer des Internets. In Deutschland hatten in 2006 ca. 67 % der Haushalte einen Zugang zum Internet (tns Infratest 2007:179).

1.5 Wireless Local Area Network WLAN

WLAN ist ein drahtloses Funknetzwerk, welches zunächst in der IT-Gerätekommunikation in Räumen oder Gebäuden genutzt wurde. Mit zunehmender Technologieentwicklung entwickelt sich WLAN auch zu einer Übertragungsform, die auf lokaler Ebene von unterschiedlichen Nutzern offen genutzt werden kann. Im Prinzip können WLAN-Netze ganze Städte umspannen, wenn eine Basisstation (Access Point) die Koordination aller anderer Netzknoten (Clients) übernimmt. Hierdurch wird beliebigen Nutzern ein lokales, kabelloses und frei zugängliches Internet zur Verfügung gestellt. WLAN wurde zunächst in zahlreichen besucherintensiven Gebäuden (Hotels, Flughäfen, Bahnhöfen) installiert, inzwischen gibt es aber auch in ganzen Stadtteilen sogenannte Hot-Spots für die kabellose Kommunikation im Internet. Auf europäischer Ebene gibt es auch Beispiele in der Stadtentwicklung (z.B. Arabian Ranta in Finnland), bei denen die kabellose Kommunikation über WLAN zur vollständigen Erschließung von Gebäuden auf der „letzten Meile“ genutzt wird. Im Unterschied zum WLAN ist das WPAN – Wireless Personal Area Network – auf geringere Distanzen beschränkt. Das wichtigste Beispiel für WPAN sind Blue Tooth Applikationen, die zur kabellosen Gerätekommunikation dienen.

1.6 Öffentlicher Mobilfunk

1958 wurde das erste Mobilfunknetz von der Deutschen Post (A-Netz, handvermittelt, „öffentlicher beweglicher Landfunk“, maximal 10.000 Teilnehmer, v.a. Autotelefone) eingerichtet. 1972 wurde das B-Netz mit Selbstwahl eingeführt (max. 27.000 Teilnehmer). Die Kommunikation zwischen Mobilfunkteilnehmern erfolgt mittels mobilen Endgeräten, deren Signale von Basisstationen erfasst und zu dem angesprochenen Teilnehmer weitergeleitet werden. Aufgrund der Attraktivität der mobilen Kommunikation wurden schnell weitere Netze von der Deutschen Post eingerichtet. Mit der Liberalisierung des Telekommunikationsmarktes wurden weitere Netze von privaten Betreibern aufgebaut und Frequenzen der bestehenden Netze von anderen genutzt. Seit 1990 wurde vor allem die Digitalisierung der Netze vorangetrieben, um mehr Teilnehmer gleichzeitig zu bedienen und diesen auch zu ermöglichen, mehr Informationen zu übertragen. Neue Verfahren wie das seit etwa 2000 entstehende UMTS-Netz¹⁶ ermöglichen Datenübertragungsverfahren mit hoher Bandbreite, die schnelle Internetzugänge oder Fernsehen über Mobiltelefon ermöglichen.¹⁷ Der ursprüngliche Mobilfunk wurde auch in den neunziger Jahren um weitere Applikationen erweitert. Hierbei ist zunächst der Short Message Service (SMS) zu erwähnen, der als Kurzform der E-mail oder des Fax anzusehen ist. Mit zunehmender Bandbreite und komfortableren Endgeräten ist es nun auch möglich, E-mails auf Handys zu empfangen und zu versenden. Eine weitere Überschneidung mit anderen Applikationen ist die Verwendung des Mobilfunks zur Navigation (Stadttouren) und Ortung.

Die wesentlichen Bestandteile eines Mobilfunknetzes sind die Mobilfunk-Basisstationen BTS¹⁸, das Switching-System und das Mobile Switching Center MSC. BTS und das Switching-System sind zumeist unmittelbar lokal zueinander zugeordnet und steuern die einzelnen Funkzellen.

Die BTS empfängt die eingehenden Nachrichten oder sendet vermittelte Nachrichten über eine Antenne. Sie wandelt analoge Funksignale in digitale um und sendet sie weiter an das Switching

¹⁶ International wird UMTS auch als WCDMA bezeichnet. Hierdurch ist eine Datenübertragungsrate von 2 Mbit/s möglich (31-fache ISDN-Geschwindigkeit), auch wenn derzeit nur 384 kBit/s verfügbar sind aufgrund der Netzarchitektur (tns Infratest 2006:245).

¹⁷ GSM hat eine typischen Übertragungsgeschwindigkeit von 9,6 kbit/s. HSCSD erreicht theoretisch 115,2 kbit/s, wobei man in der Praxis von 57,6 kbit/s bzw. 38,4 kbit/s vorfindet. Bei GPRS liegt die Übertragungsgeschwindigkeit theoretisch 171,2 kbit/s, wobei in der Praxis eher 58 kbit/s vorkommen. Bei UMTS liegt der theoretische Wert bei 2 Mbit/s (vgl. zdnets o.J.).

¹⁸ BTS = Base Transceiver Stations, im UMTS-System werden diese auch Radio-Netzwerk-System RNS genannt.

System und umgekehrt.¹⁹ Hierzu gibt es Sprach- und Datenkanäle. Basisstationen haben neben den Antennen und dem Antennenkabel einen Verstärker. Weiterhin gehören zu einer Basisstation (zumeist) ein Kühlaggregat, eine Notstromversorgung und ein Verteilschrank. Wenn die Basisstationen im Freien stehen, gibt es noch ein Gehäuse (Container), in der die Basisstation untergebracht ist sofern sie nicht auf einem Hausdach oder auf dem Dachboden untergebracht ist. Ein weiteres Element der Basisstation ist der Antennenturm.

Das Switching-System umfasst alle Elemente, die die Basisstation (BTS) und die Gesprächsvermittlung steuern (Funkschau 2001:1); es ist die eigentliche Telefonzentrale für den Mobilfunk (Emmenegger et al. 2003). Dieses System enthält einen Radio-Network-Controller (RNC) bzw. GSM-Netz Basisstationen-Controller (BSC). Der RNC bzw. BSC ist ein Steuerungsrechner, der den Wechsel zwischen den Zellen bzw. Antennen und auch die Signalstärken steuert.

Die BTS und die RNC sind an das Mobil Switching Center MSC angeschlossen. Dieser Vermittlungsknoten stellt die Verbindungen zwischen den Teilnehmern her und regelt auch Übergänge zu Partnernetzen sowohl für Mobil- als auch Festnetzgespräche. Das MSC kann hierzu auf Datenbanken zurückgreifen (Home Location Register HLR und Visitor Location Register VLR).

In 2006 gab es schätzungsweise 2,4 Mrd. Mobilfunknutzer weltweit (tns Infratest 2007:125). Ende 2006 gab es in Deutschland je 100 Einwohner ungefähr 104 Mobilfunkverträge, so dass – statistisch gesehen – jeder Deutsche mit Mobilfunk erreichbar wäre (ebd. 134).

Quantitative Aussagen über die Nutzung von Kupfer für die Verkabelung zu Kommunikationszwecken sind nur äußerst schwierig zu treffen, da die Netzbetreiber hierzu keine Daten veröffentlichen. Bisher liegen nur allgemeine Schätzungen zum Materialaufkommen für die Mobilinfrastruktur beispielsweise in Italien vor. Federico schätzt hierbei, dass die Materialintensität für das GSM-Netz bei ca. 134 kg pro Einwohner liegt und der ökologische Rucksack eines Mobiltelefons bei 75,5 kg. (Federico 2001, zitiert nach Hilty 2003:213). Auf Basis von Literaturstudien und eigenen Erhebungen hat Wittmer den Stoffhaushalt für Kupfer in der Schweiz abgeschätzt (ders. 2006). Hierbei wurden sowohl Gebäude als auch Infrastrukturen untersucht. Das Kommunikationsnetz umfasst Netzlängen von ca. 138.000 km für die Telekommunikation (Kupferkabel), für die Koaxialkabel ca. 2.000 km und für das Glasfasernetz ca. 11.000 km (Wittmer 2006:51). Auf Basis verschiedener Annahmen lässt sich dann die gesamte Kabelmasse für die Telekommunikation berechnen. Wittmer kommt hierbei zum Ergebnis, dass die Lagermenge für Fernmeldekabel ca. 108.000 t und für Koaxialkabel ca. 9.000 t beträgt (ebd.:84). Wesentlich größere Mengen – mehr als 600.000 t – werden im Stromnetz der Schweiz genutzt (ebd.:85).

1.7 Spezieller Mobilfunk

Mobilfunk wurde vor allem vom Militär und der zivilen Luftfahrt seit langer Zeit genutzt. Auch die Polizei (Polizeifunk) nutzte die Mobilfunkkommunikation schon seit den fünfziger Jahren. Im privaten Bereich wurde der Mobilfunk von „Hobbyfunkern“ genutzt. Später wurden verschiedene Frequenzen von unterschiedlichen Akteuren genutzt wie z.B. Taxifunk, der Deutschen Bundesbahn oder von Fernfahrern. Mit der Verbreitung des öffentlichen Mobilfunks und der dort verwendeten Technologien werden für diese Anwendungen zumeist nur noch wenige Frequenzbereiche reserviert. Seit einiger Zeit wird jedoch ein digitaler Polizeifunk (TETRA-System) aufgebaut. Dieser sollte eigentlich schon zur Fußballweltmeisterschaft vor einigen Jahren in Deutschland verfügbar sein, aber aufgrund technischer Probleme kam es immer wieder zu Verzögerungen.

¹⁹ Im UMTS-System heißt dies Node B.

1.8 Hörfunk

Der Hörfunk wurde seit ca. 1920 vor allen in den damaligen Industriestaaten entwickelt und genutzt. Vor Erfindung des Fernsehens wurde er zum ersten Informationsmassenmedium bis er Anfang der sechziger Jahre vom Fernsehen verdrängt wurde. Bei Hörfunk werden akustische Signale mit Mikrofonen aufgezeichnet und über Sendeanlagen breit in den Äther gesendet. Je nachdem, ob die Signale als Bodenwelle oder als Raumwelle – mit einer Reflexion an der Ionosphäre – gesendet werden, ist die Reichweite unterschiedlich regional (Bodenwelle UKW und Mittelwelle), national, international oder global (Raumwelle Lang- oder Kurzwelle). Der Empfang erfolgt mit geeigneten Antennen beim Nutzer. Der analoge Hörfunk wird wie das analoge Fernsehen in Deutschland in Zukunft nach ca. 2013 nicht mehr von den Rundfunksendern abgestrahlt. Mit der Digitalisierung des Hörfunks werden auch zunehmend Radioprogramme über das Internet „ausgestrahlt“. Auch über das Kabelfernsehen sind die digitalen Rundfunkprogramme zu empfangen.

1.9 Fernsehen

Antennenfernsehen

Die Übertragung von bewegten schwarz-weiß Bildern und von Tönen basiert auf Entwicklungen von Baird und Mihaly, die in den zwanziger Jahren die ersten Fernsehbilder mittels hochfrequenter Signale übertrugen. Hierbei wurden schon die aufgenommenen Bilder punkt- und zeilenweise abgetastet und die Helligkeitswerte erfasst. Anschließend erfolgte eine Sendung der so aufgelösten Bilder in hochfrequenter Form über Antennen mit großer Sendeleistung. Haushalte empfangen die Bilder mit eigenen Antennen und die Fernsehgeräte wandelten die Signale wieder in Bilder um. Mit der Einführung des Farbfernsehens und der Entwicklung von Systemen zur Übertragung der Farbinformation (PAL- und SECAM-System) entwickelte sich das Antennenfernsehen zu dem zweiten IuK-Massenmedium. Schon in den achtziger Jahren zeigten sich jedoch die Grenzen des Systems, da die Bildwiedergabegeräte zunehmend größer wurden und private Sender Übertragungsrechte beanspruchten. Größere Wiedergabegeräte mit Bild diagonalen von mehr als 70 cm benötigen jedoch eine Übertragung von mehr Bildpunkten zu gleicher Zeit um scharfe Bilder wiederzugeben. Auch die Übertragung von mehr Fernsehprogrammen als nur die der öffentlich-rechtlichen wurde zunehmend schwieriger, da die Haushalte dann mehr Antennen benötigten. Diesen Anforderungen konnte das antennengestützt terrestrische Fernsehen mit seinen analogen Grundlagen nicht gerecht werden. In der Folge begann die Entwicklung neuer Übertragungs- und Wiedergabeverfahren die auf der digitalisierten Informationsübertragung beruhen. Dem konventionellen analogen terrestrischen Fernsehen wird deshalb keine Zukunft mehr beigemessen²⁰, sondern nur noch dem digitalen DVB-T-Verfahren. Auch das Internet entwickelt sich zunehmend zu einem Medium, welches die Fernsehprogramme darstellen kann.

Kabelfernsehen

Seit Anfang der 80iger-Jahre wurde ein Kabelnetz von der Deutschen Bundespost in Deutschland verlegt, welches zur Übertragung von mehr analogen Fernseh- und Hörfunkprogrammen genutzt werden sollte als es damals durch das Antennenfernsehen möglich war. Mit dem Kabelfernsehen war es dann auch möglich, private Fernsehprogramme zu übertragen. Das Kabelfernsehen ist ähnlich der Festnetztelephonie. Die Signale der Programmanbieter werden über Sendestationen in ein Kabelnetz eingespeist, welche über Vermittlungsstationen an die Endkunden über (Kupfer)Koaxialkabel bis in die Haushalte weitergeleitet werden. Analoge Geräte können unmittelbar an das Kabelfernsehen (oder Rundfunk) angeschlossen werden, so dass eine Antenne überflüssig ist. Mit der zunehmenden Digitalisierung der Fernseh- und Rundfunktechnik wurde auch das digitale Kabelfernsehen eingeführt,

²⁰ In den meisten Teilen Deutschlands – d.h. in allen Ballungsräumen und vielen Bundesländer – ist die Sendung inzwischen komplett eingestellt. Ob es jedoch noch einzelne Inseln des analogen terrestrischen Fernsehens gibt, die nicht auf DVB-T umgestellt werden konnten, konnte nicht recherchiert werden.

welches auch eine upstream-Fähigkeit ermöglicht. Im Unterschied zum analogen Kabelfernsehen werden entweder sogenannte Settop-Boxen (DVB-C Receiver) gebraucht, die den Betrieb der Geräte ermöglichen, oder Geräte, die digitale Signale verarbeiten können. Mit der Digitalisierung wurden auch weitergehende Funktionen ermöglicht wie z.B. die Telefonie über Kabel oder Internetzugänge.

Satelliten-Fernsehen

Satelliten-Kommunikation wurde anfänglich für die Telefonie und Fernschreiben genutzt. Später kam das Fernsehen und der Rundfunk und in neuerer Zeit das Internet hinzu. Beim Satellitenfernsehen werden im Unterschied zum Antennenfernsehen die Bildsignale von einer Sendestation – dem Fernsehsender – über Satellitenschüsseln zu einem orbitalen oder geostationären Satelliten gesendet, der die Signale in seinem Abstrahlbereich an die Empfänger sendet. Die individuellen Empfänger können die Signale mit einer Satellitenschüssel empfangen, die die Signale wieder entweder in analoge Signale umwandelt oder die von digitalen Endgeräten unmittelbar genutzt werden. Parallel zum Satellitenfernsehen hat sich auch der Satellitenrundfunk etabliert. Der Grund für die Nutzung von Satelliten zur Verbreitung von Fernsehsignalen liegt vor allem in der Programmausweitung. Mit dem Satellitenfernsehen können viel mehr Programme übertragen werden als dies bei terrestrischen Sendesystemen möglich ist. Dies erklärt sich auch durch die Satellitenkommunikation untereinander, da z.B. australische Fernsehprogramme leicht über Verteilsatelliten (Relaisstationen) z.B. zu europäischen Fernsehsatelliten weitergeleitet werden können. Direktsatelliten hingegen senden Signale, die mit Parabolantennen von den Nutzern empfangen werden können. Das erste Satellitenfernsehen wurde 1962 erprobt zwischen den USA und Frankreich. Hierbei wurde der Telstar-Satellit genutzt, später kamen noch Intelsat, Kopernikus und L-Sat hinzu.

1.10 Parallelität der Infrastrukturen

Die bisherigen Infrastrukturen sind vor allem durch eine Parallelität der Infrastrukturen gekennzeichnet, d.h. gleiche Inhalte werden auf verschiedenen Wegen übertragen. Man kann sowohl über den Festnetzanschluss telefonieren als auch über Mobilfunk. Man kann über den Mobilfunk, über Kabel- oder DSL-Anschluss surfen. Auf der einen Seite stehen die leitungsgebundenen Systeme mit Kupfer- und Glasfasernetzen für DSL bis hin zu ADSL2+, auf der anderen Seite stehen die vielfältigen Funknetze (digitales Fernsehen und Hörfunk, Satellitenkommunikation, WiMax, UMTS, HSDPA, GSM, GPRS, Edge, WPAN und Bluetooth, WLAN). Beide Netze werden zunehmend für gleichartige Nutzungen (Internet, Fernsehen, Hörfunk, Telefonie) genutzt. An der rasanten Entwicklung der DSL Geschwindigkeiten, 1000 bis inzwischen 16.000 kbit/s ist zu erkennen, dass angebotsorientiert ein Markt geschaffen wird, dessen Content derzeit nicht abschließend vorstellbar ist. Sicher ist mit Einschränkungen allerdings, dass mittelfristig die Übertragungsstandards für den Verbraucher immer unwichtiger sein werden. War früher mit dem Kabelanschluss nur ein Fernsehempfang möglich so ist heute auch ein Internetzugang möglich. Moderne EDV (Set-Top Boxen) stellen sicher, dass alle gängigen Protokolle interpretiert und auf den entsprechenden Ausgabeeinheiten angezeigt werden können. Der Computer kann heutzutage sowohl für das Internet als auch zum Fernsehen, für Hörfunk und zum Telefonieren genutzt werden. Ebenso haben die Fernsehhersteller nachgerüstet, die ihre Geräte auch für das Internet nutzbar machen. Die Telekom bietet Home-Entertainment an, d.h. einen digitalen Shop für das Fernsehen der – obwohl ein Internetportal – über den Fernseher verfügbar ist. Schwachstellen im Bereich des Fernsehens sind vor allem die Interaktivität, d.h. nicht alle Systeme haben einen uplink-Kanal, mit dem der Nutzer seine Bedürfnisse auch dem Netz mitteilen kann. Aber auch dies wird sicher in naher Zukunft kein Problem mehr sein.

Wenn aber auf allen Systemen gleichartige Inhalte verfügbar sind, stellt sich die Frage, welches System sich letztendlich durchsetzen wird. Bei den kabelgestützten Systemen wird es möglicherweise auf eine Datenübertragung mit Glasfaser hinauslaufen, da hier eine Konvergenz der verschiedenen Angebote (z.B. triple-play / Telefonie, Internet, Fernsehen, Video-on-demand) möglich ist. Im Gegensatz hierzu ist der Datendurchsatz auf Kupferbasis sehr begrenzt. Im lokalen Bereich werden

WLAN Netze die verschiedenen Kommunikations-/ Info- und Entertainment-Inhalte zur Verfügung stellen. Im Ansatz wird dies von Providerseite bereits umgesetzt, so hat man etwa mit einem T-Online Account die Möglichkeit, alle Hot-Spots des Unternehmens kostenfrei zu nutzen. Diverse Städte arbeiten an einer flächendeckenden WLAN Infrastruktur.

Während in den Ballungsregionen es leicht und einigermaßen kostendeckend möglich ist, mittels Glasfaserverkabelung und WLAN auch die Vorteile des Mobilfunks aufzunehmen (d.h. hohe Übertragungsraten und kabellose Verfügbarkeit), stellt sich die Situation in den ländlichen Regionen deutlich anders dar. Hier ist es nicht möglich, kostengünstig mit Glasfaserverkabelung alle Haushalte zu erreichen und auch noch WLAN-Netze in den kleinen Dörfern flächendeckend zu errichten - aufgrund zu hoher Leitungskosten bei gleichzeitig zu geringen Nutzerzahlen. In ländlichen Regionen versucht man mittels WiMax (auch eine WLAN Technik) die hohen Infrastrukturkosten der Glasfaserkabelverlegung zu minimieren. Hier soll die WLAN Technik die Landstriche an die moderne IKT anbinden. Im Bereich des UMTS Breitbandes ist es inzwischen möglich, mobil einen hohen Datendurchsatz zu erzielen. Hier sind, wie bei allen Technologien in diesem Bereich, sowohl der Downlink, als auch der Uplink bedeutende Determinanten. Der Downlink (oder Downstream) ist in der Regel höher als der Uplink (oder Upstream).

2 Architektur des Mobilfunksystems

Im Rahmen der Analyse des Mobilfunksystems wird nur der gewerblich-private Mobilfunk betrachtet, der von der Telekom, Vodafone, Eplus und Telefonica (O2) angeboten wird. Spezielle Systeme für das TETRA-System der Polizei oder der Bahn-Mobilfunk werden nicht betrachtet.

Im Mobilfunk gibt es in Deutschland inzwischen zwei digitale Standards der Signalübertragung. Der erste ist der GSM-Standard (Global System for Mobile Communication), das zweite der UMTS-Standard (Universal Mobile Telecommunication System). Die wesentlichen Unterschiede zwischen GSM und UMTS sind die Bandbreiten, die beim UMTS höher sind, sowie die Sendeleistungen, die beim UMTS geringer sind. Die Infrastruktur für GSM und UMTS ist jedoch weitgehend gleich.

Zur Vermittlung von Gesprächen sind jedoch mehr als nur Sende-Empfänger-Stationen notwendig. Gespräche vom Handy („Mobil Station“ MS) werden in einem ersten Schritt zu den Basisstationen (BTS bei GSM und RNS bei UMTS) geleitet. Eine große Anzahl von BTS bzw. RNS werden von Basisstationen-Controller (BSC bei GSM und RNC bei UMTS) zum einen gesteuert und zum anderen für die Gesprächsweiterleitung genutzt. Von diesen gehen die Gespräche zu den MSC, die gleichfalls die Controller steuern und auch die Gespräche weiterleiten. Genauso wie der BSC/RNC ist auch der MSC ein größerer Computer, der allerdings noch mit weiteren Datenbanksystemen (VLR Visitors Location Register, HLR Home Location Register, AuC Authentication Center, EIR Equipment Identity Register) verbunden ist. Wenn beispielsweise ein Mobilfunkteilnehmer angerufen wird, so landet sein Anruf zunächst in der GMSC (Gateway MSC).²¹ Diese prüft in der HLR, ob das Mobiltelefon aktuell zugelassen ist und ob das Gespräch durchgestellt werden darf. Die HLR wiederum richtet eine Anfrage an die VLR, wo sich der Teilnehmer gerade aufhält. Ist dies bekannt, bestimmt die HLR, welche MSC zuständig ist, d.h. in welchem Bereich der Teilnehmer sich gerade aufhält. Diese Informationen werden an das GMSC weitergeleitet, die das Gespräch an die zuständige MSC weiterleitet. Das MSC fragt dann wieder bei der VLR an, ob das Handy jetzt gerade verfügbar ist. Ist dies der Fall, wird der Ruf an die BSC weitergeleitet und dort an die zuständig BTS.

Das alte GSM-Netz der zweiten Generation²² wurde jedoch sukzessive erweitert, um weitere Serviceangebote bereitstellen zu können. In der zweiten Generation von GSM (HSCSD, GPRS,

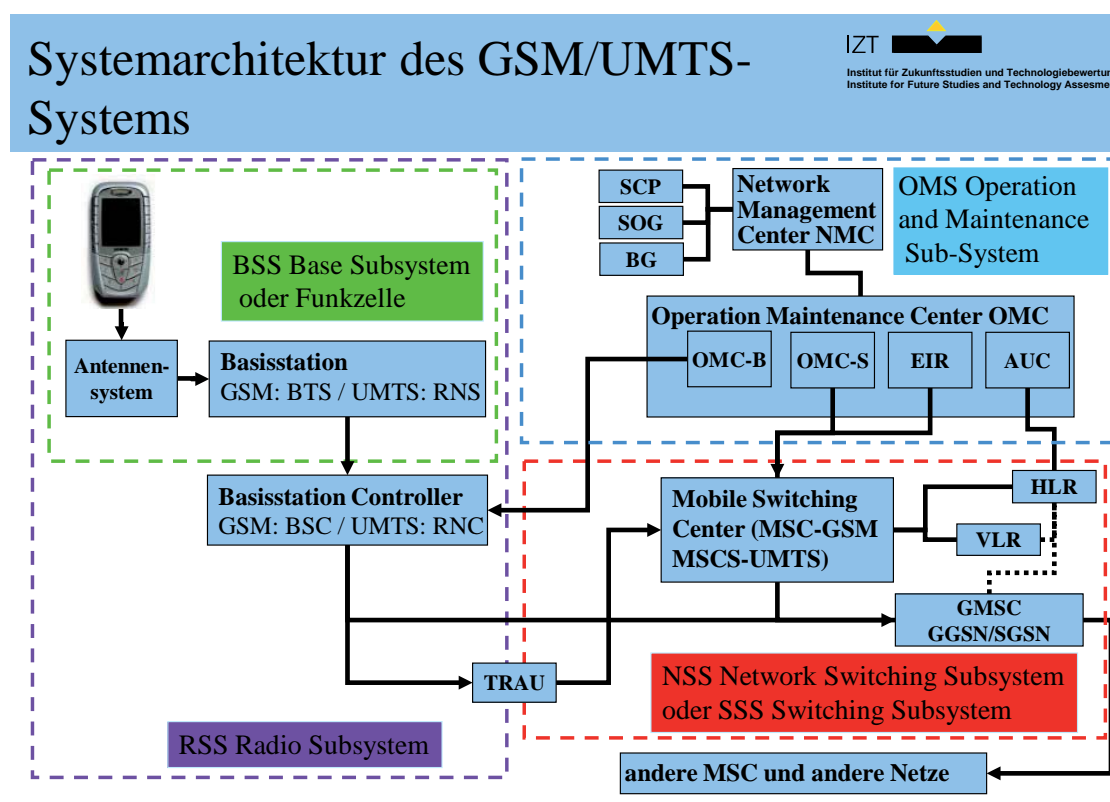
²¹ In der Literatur gibt es sehr unterschiedliche Pfade, welches Geräte sich an dieser Stelle einschaltet. Es gibt sowohl Beispiele, nach denen der Ruf zur MSC geht als auch zum GMSC.

²² Die erste Generation ist das analoge Mobilfunknetz.

EDGE etc.) wurden Schnittstellen zu Datendiensten bzw. Zugänge zum Internet eingeführt. So gut wie alle neuen Mobiltelefone unterstützen GPRS zum Beispiel als Datenübertragungsdienst für die Betrachtung von WAP-Seiten. Der Multimedia Messaging Service (MMS) basiert ebenfalls auf GPRS. Oft kann auch ein Computer oder Handheld mit dem GPRS-fähigen Mobiltelefon verbunden werden, um diesen Geräten einen schmalbandigen Internetzugang zu gewähren. Das Mobiltelefon fungiert dann als Modem. Auch wenn diese Verbindung eine geringere Datenübertragung ermöglicht als bei UMTS, so ist doch der Vorteil, dass das GSM-Netz eine höhere Netzabdeckung hat. Weiterhin können über GPRS auch Ortungsdaten zu Fahrzeugen übertragen werden. Diese Datenschnittstellen werden durch SGSN (Serving GPRS Support Node) und GGSN (Gateway GPRS Support Node) ausgefüllt.

Darüber hinaus wird das Netz durch das Operation Management Center (OMC) gesteuert. In der folgenden Abbildung ist das komplexe System schematisch dargestellt:

Abbildung 3: Architektur des Mobilfunksystems



Dr. Michael Scharp/MaRes

Quelle: Eigene Darstellung

Der erste Systemteil (BSS Base Subsystem) in der Architektur des Mobilfunksystems bildet das Base Subsystem BSS mit den Antennen und den Basisstationen²³. Das Mobiltelefon sendet seine Signale an die Antennen, denen unmittelbar die BTS bzw. RNS zugeordnet sind (vgl. Abbildung 3) und die sich vor Ort in der Nähe der Handybenutzer befinden. Die Basisstation ist zwar der zentrale „Anlaufpunkt“ des Nutzers, ist jedoch nicht identisch mit der Funkzelle. Basisstationen können eine Funkzelle bilden, können aber auch mehrere Funkzellen gleichzeitig bedienen. Nach ISI / CEPC ist der Anteil der Funkzellen ca. 2 bis 3 mal höher als die der Basisstationen (ebd. 2003:101). Die Zahl der Funkzellen ist für die Infrastruktur des Mobilfunks jedoch in primärer Hinsicht nicht relevant.²⁴ Aufgrund eines sich im Laufe der Jahre entwickelnden Bedarfs für die Datenübertragung wurde das

²³ Im GSM-Netz an die BTS (Base Transceiver Station), im UMTS-System an den RNS (Radio-Netzwerk-System oder auch Node B).

²⁴ Bezüglich der Handlungsoptionen sollte geprüft werden, ob eine Optimierung der Funkzellen eine Reduktion der materiellen Basisstationen ermöglichen könnte.

GSM-System sukzessive erweitert. In den 90iger-Jahren war es zunächst GPRS, mit dem auch Daten übermittelt werden konnten (z.B. Webmails). Später erfolgte die Einführung der EDGE-Technologie mit einer höheren Datenübertragungsrate, so dass das GSM immer ähnlicher hinsichtlich seiner Leistungsfähigkeit zu dem UMTS-System wurde.

Der zweite Systemteil (RSS Radio Subsystem) umfasst die Basisstation, den Basisstationscontroller (BSC/RNC) und den TRAU (Transcoding and Rate Adaptation Unit).²⁵ Die Basisstationen leiten die Signale an den Basisstation Controller (BSC/RNC), der zahlreiche Basisstationen steuert. Die Verbindung zwischen den Basisstationen und den Basisstationen-Controller (BSC/RNC) kann über Leitung oder Richtfunk erfolgen. Der Controller entscheidet über die Nutzung der Funkkanäle, die Leistungsregelung und Handover.²⁶ Bevor das Signal weitergeleitet wird, wird es vom TRAU in eine höhere Bitrate umgewandelt. Der TRAU ist aber physisch zumeist dem nachfolgenden Switching System zugeordnet und sendet die Signale an die nächste Ebene.

Der dritte Systemteil ist das Network Switching Subsystem (NSS) oder einfach Switching Subsystem. Das NSS ist die eigentliche Vermittlungsebene, bei der eingehende Anrufe an den Angerufenen weitergeleitet werden. Im NSS werden auch die Verbindungen mit den anderen Mobilfunknetzen sowie den Festnetzen (Telefon, Internet) geschaltet. Kernstück des NSS ist das MSC – Mobile Switching System – bzw. SGSN im UMTS-Netz – welches die Verwaltung der Verbindungen und die Nutzerdatenverwaltung übernimmt. Darüber hinaus werden die BSC bzw. RNC von den MSC vernetzt und gesteuert. Verschiedentlich werden in der Literatur auch BSC bzw. RNC und die zugehörigen MSC zum Switching System zusammengefasst, da die Basisstationscontroller BSC/RNC zumeist mit den MSC in Rechenzentren zusammengefasst sind. Die MSC werden zumeist über ein Kabelsystem vernetzt, welches auch die Schnittstelle zu den kabelgestützten Systemen (Festnetz, Internet) darstellt. Zur Abwicklung der Gespräche nutzt die MSC verschiedene Datenbanksysteme. In dem HLR (Home Location Register) sind die Daten der Kunden gespeichert für die Gebührenabrechnungen, Zugriffsberechtigung (SIM-Karte) oder aktuelle Einstellungen des Nutzers (z.B. Rufumleitung). In dem VLR Visitor Location Register – einer „Besucherdatei“ – sind die Adresse und die Rufnummer des Handys gespeichert und an die jeweiligen MSC gesendet. In diesem Register wird auch der aktuelle Standort des Nutzers verzeichnet und ständig aktualisiert. Über den MSC erfolgen auch die Anschlüsse an die anderen Netze (Kabeltelefonie, Internet). Die MSC sind zumeist über das Kabelverbindungsnetz untereinander verbunden. Dem NSS sind auch die Schnittstellen zum Festnetz, dem Internet und die anderen Mobilfunknetze zugeordnet. Dies erfolgt über die GMSC Gateway MSC bzw. GGSN Gateway GPRS Support Node. Die GMSC muss hierbei zur Ermittlung des Standorts des angerufenen Teilnehmers in der HLR des jeweiligen Netzes diesen ermitteln.

Der letzte Systemteil ist das OMS Operation and Maintenance Subsystem, welches zum einen das gesamte Netz steuert und über das Wartungsarbeiten an den Teilsystemen vorgenommen werden können. In das OMS fallen das NMC Network Management Center, welches die Schnittstelle zwischen der Kundenbetreuung (Administration) und der Netztechnik bildet sowie das OMC Operation Management Center²⁷, welches das Netz steuert und überwacht. Zu dem OMC zählen die OMC-B, welche die Basisstationscontroller überwachen und die OMC-S, welche die MSC überwachen. Zum OMC zählen auch weitere wichtige Datenbanken. Dies sind die EIR – Equipment Identity Register, in der die internationale Kennung des Handys gespeichert ist und die zur Sperrung im Falle des Verlustes des Geräts benötigt wird. Die zweite Datenbank ist das AuC – Authentication Center, die die Funkschnittstelle abhörsicher machen soll und Verschlüsselungskennzeichen der SIM-Karte enthält und zu deren Identifizierung notwendig ist. Beide Datenbanken sind allerdings physisch bei den MSC angebunden.

²⁵ Im Rahmen der Recherche konnte nicht geklärt werden, ob heutzutage der TRAU noch als eigener Systembestandteil aufgeführt werden sollte oder nicht.

²⁶ Die letzten Merkmale können auch von den Basisstationen übernommen werden. Vgl. ELKO o.J.:2.

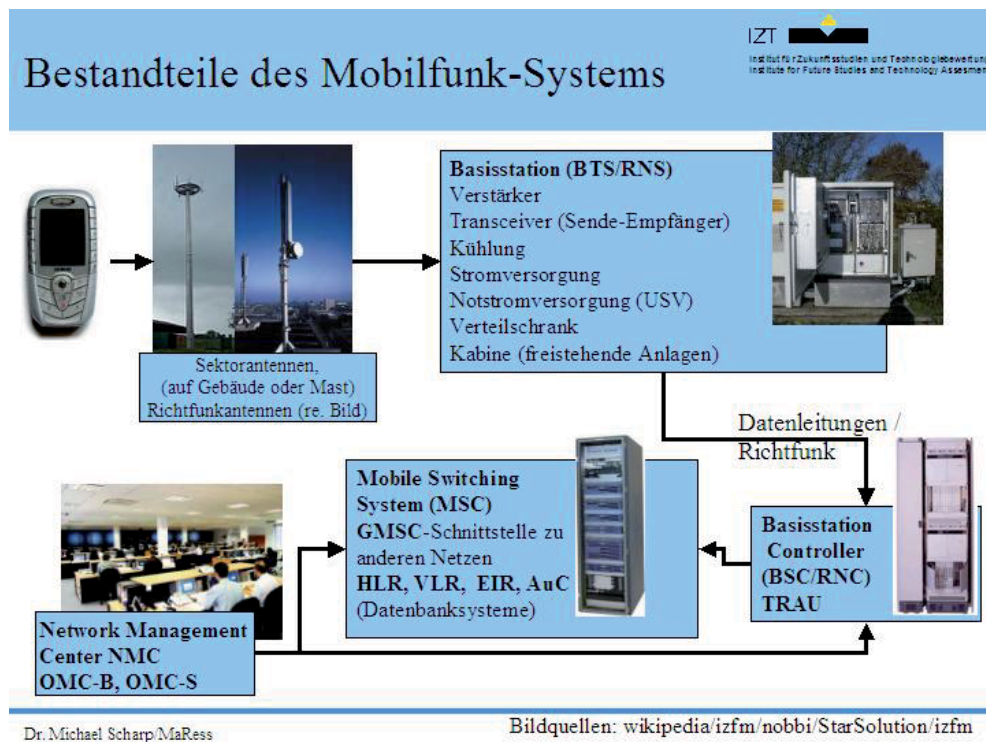
²⁷ In der Literatur wird auch häufig der Begriff NMC Network Management Center gebraucht.

Für die Kundenbetreuung sind drei Systeme von Bedeutung: der SCP Service Control Point, der Dienste für den Nutzer aktiviert; das SOG Service Order Gateway, welches das Switching-System mit der Administration verbindet und das BG Billing Gateway zur Erfassung gebührenrelevanter Daten (Ericsson 2001).

2.1 Primäre Bestandteile der Mobilfunk-Systemteile

Wie oben dargestellt, sind die Infrastrukturbestandteile der beiden Systeme sehr ähnlich. Ein wichtiger Unterschied – der sich auch auf die Materialbilanz der Infrastruktur auswirkt – ist die unterschiedliche Zellgröße der Basisstationen. Die Zellgröße im GSM-System beträgt in der Stadt wenige hundert Meter und auf dem flachen Land bis hin zu ca. 35 km. Die Zellgröße im UMTS-System ist wegen geringer Sendeleistung deutlich geringer und liegt eher im Bereich bis zu wenigen hundert Metern. Aufgrund dessen ist die Anzahl der Basisstationen, die für ein flächendeckendes UMTS-Netz benötigt wird, deutlich höher als für ein GSM-Netz.²⁸ ISI/CEPC gehen davon aus, dass zur gleichwertigen Versorgung mit UMTS ca. 2-3 Basisstationen gegenüber GSM notwendig sind (ISI/CEPC 2003:100). Allerdings wird dies erst mittel- bis langfristig erfolgen, da GSM und UMTS auf eine nicht absehbare Zeit nebeneinander bestehen bleiben.

Abbildung 4: Bestandteile des GSM/UMTS-Systems



Quelle: Eigene Darstellung. Bilder: wikipedia (Handy) / izfm (Antenne rechts) / nobbi.com (Antenne links, BTS) / Starsolution (MSC/BSC) / izfm (NMC)

²⁸ Die schlechtere Abdeckung ist insbesondere bei Bahnfahrten zu sehen, wenn ein Mobilfunkgerät von UMTS auf GSM wechselt. Dies ist vor allem auf Bahnstrecken abseits von dichter besiedelten Räumen zu sehen.

2.1.1 Basisstationen (BTS/RNS)

Anzahl der Basisstationen

Es sind nur wenige Zahlen zu der Anzahl der Basisstationen verfügbar, da auch die Netzbetreiber keine hinreichenden Angaben machen.²⁹ Nach dem Informationszentrum Mobilfunk (IZMF) gibt es in Deutschland „derzeit“ 62.000 Basisstationen (ohne Jahresangabe und ohne Unterscheidung zwischen UMTS und GSM, dies. o.J.). Um eine flächendeckende Versorgung von Deutschland mit UMTS zu erreichen – wie es bei der Vereinbarung der UMTS-Lizenzen vereinbart war – müssten ca. 30.000 bis 40.000 UMTS-Basisstationen errichtet werden (NIK 2004:77; RegTP 2001). In 2007 hat die Bundesnetzagentur weitere Zahlen zur Anzahl der Basisstationen veröffentlicht. Mit dem Stand März 2007 sollten 67.000 GSM- und 36.000 UMTS-Basisstationen existieren (BNA Bundesnetzagentur 2007:6). Im Jahresbericht 2009 wurde die Anzahl der UMTS-Basisstationen von der BNA mit 39.000 angegeben, aber keine Aussage zur Anzahl der GSM-Stationen gemacht (Bundesnetzagentur 2009:55).³⁰ In der folgenden Tabelle sind die recherchierbaren Werte zu den Basisstationen sowie die Prognosen aus zwei Forschungsprojekten der Jahre 2003 und 2004 aufgeführt:

Tabelle 7: Entwicklung der Basisstationen (ISI/CEPC und NIK).

Element	2001	2005	2007 BNA (2009 BNA)	Anzahl 2010 (ISI/CEPC)	Anzahl 2010 (NIK)
GSM Basisstation gesamt	50.700	62.900 [#]	67.000	63.000 [#]	65.000 [#]
GSM Vermittlungsstandorte gesamt	230	286 [#]		286 [#]	
UMTS Basisstation gesamt	0	20.600 [#]	36.000 (39.000)	79.200 [#]	60.000 [#]
UMTS Vermittlungsstandorte gesamt	0	86 [#]		330 [#]	

Quelle und Anmerkung: Fraunhofer ISI / CEPC (2003): zitiert nach NIK 2004:31. # = Prognose (2005/2010)

Nach ISI/CEPC ist nicht davon auszugehen, dass sich die Zahl der GSM-Basisstationen deutlich höher entwickeln wird als in ihren Prognosen für das Jahr 2010, da nach Auskunft der Netzbetreiber dieses Netz ausreichend flächendeckend ist. Eine gewisse Unsicherheit hinsichtlich der Erweiterung des GSM-Netzes besteht in der Einführung von Modifikationen des GSM-Netzes wie z.B. durch HSCSD oder GPRS, da diese Erweiterungen an den bestehenden GSM-Stationen ansetzen und nicht sicher ist, ob hierzu auch Modifikationen der Basisstationen z.B. in großen Zellen notwendig sind. Hiervon sind insbesondere Basisstationen betroffen, die nicht auf die neuen Modifikationen umprogrammierbar sind (vgl. ISI/CEPC 2003:101).

Auf Basis der Recherchen zu der Verteilung der Basisstationen auf die verschiedenen Netzbetreiber konnten die folgenden Daten für unterschiedliche Jahre ermittelt werden:

²⁹ In einer Datenbank der Netzagentur können alle Stationen angezeigt werden. Vgl. <http://emf.bundesnetzagentur.de/gisinternet/index.aspx?User=1000&Lang=de>.

³⁰ Für das erste Quartal 2009 hat die Bundesnetzagentur die Zahl der UMTS-Basisstationen mit 39.000 angegeben, also 3.000 mehr als oben angenommen. Hierbei ist zum einen zu berücksichtigen, dass UMTS und GSM wenn möglich an einem Standort zusammengefasst werden, d.h. die zusätzlichen Stationen könnten in vorhandene GSM-Stationen integriert sein. Zum anderen verwenden die Netzbetreiber inzwischen duale Systeme, die sowohl UMTS als auch GSM übertragen können. Bei diesem dualen Ausbau werden die GSM-Stationen im Prinzip aufgelöst. Da die BNA hierzu aber keine Aussage macht, wird der neuere Wert der BNA für die UMTS-Stationen nicht verwendet.

Tabelle 8: Entwicklung der Basisstationen für verschiedene Jahre (Netzbetreiber).

Element	T-Mobile	Vodafone	E-plus	o2	Gesamt
GSM Basisstation	19.000 (a)	17.000 (a)	13.000 (a)	9.000 (a)	58.000 (a)
	-----	-----	17.950 (b)	-----	-----
	19.000 (g)	18.000 (e)	18.000 (g)	12.000 (c) 17.000 (d)	67.000 (g)
UMTS Basisstation	7.000 (f)	-----	-----	-----	-----
	10-12.000 (a)	8-10.000 (a)	1-2.000 (a)	keine eigenen (a)	20.000 (a)
	-----	-----	5.800 (b)	-----	-----
	-----	-----	-----	8.000 (c)	-----
	12.000 (g)	10.000 (g)	5.800 (g)	8.000 (g)	35.800 (g)

Quellen und Anmerkungen: a = NIK 2004 für das Jahr 2004; b = Angaben auf Wikipedia für das Jahr 2007 für e-plus; c = Angaben von o2 für das Jahr 2008, vgl. auch Network Computing 2008; d = laptopkarten.de, Mitteilung Februar 2008, <http://www.laptopkarten.de/UMTS-Netzabdeckung/umts-abdeckung.html>, e = Angaben des Handelsblattes für da Jahr 2008; f = Unternehmensangaben von T-Mobile für das Jahr 2002; g = eigene Schätzung oder Übernahme von Daten aus den Schätzungen.

Fasst man die Ergebnisse zusammen, so dürfte der Bestand an Basisstationen in 2008 zwischen 60.000 und 70.000 für das GSM-Netz liegen. Der untere Wert würde sich ergeben, wenn sich die Prognosen von ISI/CEPC nicht vollständig erfüllt hätten. Der höhere Wert würde sich ergeben, wenn zusätzlich zu den Angaben der Unternehmen (Tabelle 8) die Telekom und Vodafone ihre Anzahl der Basisstationen noch ausgeweitet hätten. Schwieriger hingegen ist die Zahl der UMTS-Basisstationen zu beurteilen. In 2004 sollen es nach NIK ca. 20.000 Stationen gewesen sein. Übernimmt man alle Schätzungen aus den verschiedenen Jahren mit den jeweiligen Maximalwerten für das Jahr 2008, so ergeben sich ca. 36.000 Basisstationen für UMTS. Allerdings sollte der UMTS-Ausbau von O2 erst im Jahre 2009 vollständig erfolgt sein (Network Computing 2008). Nach der Bundesnetzagentur waren an 70 % aller Mobilfunkstandorte somit UMTS verfügbar. Für das erste Quartal 2009 hat die Bundesnetzagentur die Zahl der UMTS-Basisstationen mit 39.000 angegeben, also 3.000 mehr als oben angenommen. Hierbei ist zum einen zu berücksichtigen, dass UMTS und GSM wenn möglich an einem Standort zusammengefasst werden, d.h. die zusätzlichen Stationen könnten in vorhandene GSM-Stationen integriert sein. Zum anderen verwenden die Netzbetreiber inzwischen duale Systeme, die sowohl UMTS als auch GSM übertragen können. Bei diesem dualen Ausbau werden die GSM-Stationen im Prinzip aufgelöst. Da die BNA hierzu aber keine Aussage macht, wird der neuere Wert der BNA für die UMTS-Stationen nicht verwendet (Bundesnetzagentur 2009:55).

Von gewichtiger Bedeutung sind noch zwei Faktoren: Die Mehrfachnutzung von Standorten durch mehrere Netzbetreiber und die Anzahl der UMTS-Stationen, die in einer GSM-Station integriert sind. Standorte für Basisstationen werden von den Netzbetreibern häufig gemeinsam genutzt. Nach einer Analyse der Bundesnetzagentur für das Jahr 2004 waren nur ca. 30 % der Standorte mit einer Funkanlage ausgerüstet. Nimmt man die von der Bundesnetzagentur ermittelten Zahlen als Grundlage für die Berechnung der Standorte, so würde sich das folgende Bild ergeben, wenn man als unteren Wert der Basisstationen 90.000 (BTS und RNS) und als oberen Wert 106.000 (BTS und RNS) ansetzten würde:

Tabelle 9: Standortmitnutzung von Mobilfunkanlagen (2004) und Umrechnung auf die Standortzahlen in 2008

Element	Anteil 2004	Anlagenzahl	Minimalwert 2008	Maximalwert 2008
Standort mit einer Funkanlage	29 %	1	26.100	30.700
Standort mit zwei Funkanlagen	40 %	2	18.000	21.200
Standort mit drei Funkanlagen	19 %	3	5.700	6.700
Standort mit vier Funkanlagen	8 %	4	1.800	2.100
Standort mit fünf und mehr Funkanlagen	4 %	5	720	850
Summe	51.108		52.300	61.620

Quelle und Anmerkungen: Standortverteilung gemäß Bundesnetzagentur für das Juli 2004, Anlagenzahl 51.108. Da es keine Hinweise gibt, wie viel Prozent der Anlagen fünf, sechs, sieben oder mehr Funkanlagen haben, muss hierbei eine Annahme getroffen werden über die Zahl der Anlagen. Es wird deshalb angenommen, dass maximal fünf Anlagen pro Standort möglich sind. Die Minimal- und Maximalwerte sind die oben angeführten Schätzwerte.

Problematisch ist jedoch, dass keine Unterscheidung zwischen BSC und RNC gemacht wird, denn von entscheidender Bedeutung für die Abschätzung einer Ressourcenbilanz ist, ob GSM- und UMTS-Standorte getrennt sind oder ob es gemeinsame Standorte sind. Ein gemeinsamer Standort bedeutet, dass bestimmte Bauelemente wie Stromversorgung, Kühlung oder Masten gemeinsam genutzt werden. Eine einfache Differenzbildung der Standortzahlen von GSM und UMTS ist jedoch nicht möglich, da GSM die Fläche der Bundesrepublik Deutschlands abdeckt, UMTS jedoch nur die Ballungsräume, die Städte und die bevölkerungsreichen Gemeinden. Nach Auskunft eines Netzbetreibers werden UMTS-Basisstationen weitgehend in die GSM-Basisstationen integriert, aber da für UMTS eine größere Anzahl von Stationen notwendig sind, müssen weitere Standorte geschaffen werden. Folglich muss eine Anzahl von UMTS-Standorten als singulär, d.h. als nicht an eine GSM-Basisstation angedockt angesehen werden.

Darüber hinaus ergibt sich eine weitere Schwierigkeit bei der Abschätzung der Infrastruktur. Das Huawei-System beispielsweise, welches ein Netzbetreiber zukünftig verstärkt nutzen wird, integriert GSM und UMTS in einer Basisstation, zudem kann ein GSM-System mit den Anlagen von Huawei auf UMTS umgestellt werden. Es ist jedoch nicht bekannt, in welchem Umfange diese Systeme genutzt werden. Unabhängig von diesen Schwierigkeiten wird die Anzahl der Basisstationen für UMTS auf Werte zwischen 30.000 und 36.000 Stück geschätzt (s.a. Fußnote 30).

Gesamtmassen von Basisstationen

Nach der Abschätzung von Malmudin (ders. 2007) beträgt das Gewicht der durchschnittlichen Ausstattung einer RBS-Site ca. 240 kg. Auf dieser Basis ergeben sich für Malmudin ca. 37 kg Equipment, welches jährlich benötigt wird. Hinzu kommen noch pro Basisstation 24 t Stahl und Zement, die zu einem Stofffluss von 390 kg pro Jahr führen. Malmudin (2007:3) gibt die Lebensdauer der Bestandteile einer „RBS-Site“ (Basisstation) mit 3 bis 20 Jahren an.³¹ Der untere Wert betrifft vor allem die Elektronik (Racks), der obere Wert bezieht sich z.B. auf Fundamente oder Zäune.

Elektronische Ausstattung der Basisstationen

Basisstationen sind komplexe elektronische Geräte, die eine gewisse Ähnlichkeit mit Computern haben. Die Basisstation enthält Verstärker und Transceiver (Emmenegger 2003:8), die in Racks angeordnet sind. Nach Scharnhorst gehören zu jeder BTS bzw. RNS 2 bis 3 der im folgenden beschriebenen Racks (ders. 2003:43 und 155). Gespräche mit einem Mobilfunkbetreiber zeigten jedoch, dass der Stand der Technik eher je einem Rack pro UMTS und GSM-Basisstation entspricht. Die Lebensdauer wird von Emmenegger auf 10 Jahre und von ISI/CEPC auf 8 Jahre geschätzt (Emmenegger 2003:7, ISI/CEPC 2003:177). Der Mobilfunkbetreiber schätzt die Nutzungsdauer auf

³¹ Die Berechnung von Malmudin lassen sich nicht plausibel nachvollziehen hinsichtlich des Einsatzes der angenommenen jährlichen Stoffflüsse. Sie werden deshalb auch in dieser Ressourcenbilanz nur der Vollständigkeit halber aufgenommen.

weniger als fünf Jahre ein. Die folgende Beschreibung von Emmenegger bezieht sich auf die eigentliche Vermittlungseinheit, wohin gegen Scharnhorst die komplette Basisstation beschreibt.

Tabelle 10: Zusammensetzung von Basisstationen.

	RBS 3202 *	GSM 900	UMTS Rack ³²	
Bauteile	Gewicht [kg]	Gewicht [kg]	Gewicht [kg]	Kommentar
Batterien	43			Bleiakkus, 12 Stück
Netzteile	3			Stahlblech, Aluminium, Kondensatoren
Einschübe	27			Ca. 50 Einschübe mit elektronischen Komponenten, höherer Anteil an Aluminium und Messing
Kühlung outdoor	25			
Ventilator			3,4	
Antennenfilter			12	3 Stück
Antennenverbinder		6		4 Stück
Transceiver		28	9	12 / 3 Stück
Verstärker		4	30	2 / 3 Stück
Exchange Terminal			5,2	10 Stück
Core Basic Moduls		8		4 Stück
Kabel		1,4	1	Kupfer/PE
Gehäuse		170	180	Stahl, Aluminium
Gesamt	98	220	240	
Materialien	Gewicht [kg]	Gewicht [kg]	Gewicht [kg]	
Aluminium	30			
Kupfer	10			
Stahlblech verzinkt	44			
Sonstiges	k.a.			Koaxialkabel, Leiterplatten

Quelle: RBS 3202 / Emmenegger 2003:64-68. Zu den Werten der RBS 3202 wurden auch die Werte für die Kühlung Typ 42vkc-18 aufgenommen. Hierbei bestehen jedoch Unklarheiten hinsichtlich der Vergleichbarkeit der Daten. In der Zusammensetzung der RBS werden die Batterien als gewichtig aufgeführt, aber bei den Materialien der stofflichen Analyse (Spalte Materialien) wird Blei nicht aufgeführt. Allerdings finden sich die Batterien bei der Analyse der GSM 900 bei Scharnhorst wieder (ders. 2006:148).

Stromversorgung der Basisstationen

Weiterhin verfügt eine Basisstation über eine DC-Stromversorgung sowie eine Notstromversorgung.³³ Die Gleichrichtermodule können als Einschübe konstruiert sein und können zusammen mit der Telekommunikationstechnik in einem Gehäuseschrank untergebracht werden. Alternativ sind auch Wandgehäuse möglich. Ein Gleichrichtermodule des Typs Slimline 500 der Fa. Benning – nach eigener Auskunft ein bedeutender Ausrüster für die Stromversorgung der Mobilfunksysteme – wiegt 1 kg, die Slimline 1500 mit einer Ausgangsleistung von 1.500 Watt wiegt 1,7 kg. Für eine typische BTS/RNS reicht die Slimline 500 aus, nur für größere Anlagen werden auch leistungsstärkere Gleichrichtermodule benötigt. Möglich wäre auch eine Stromversorgung in einem eigenen Gehäuse – wie sie in den MSC üblich sind – die alle Racks zentral versorgen. Nach Auskunft von Benning ist dies bei Basisstationen jedoch eher nicht der Fall. Prinzipiell ist es auch möglich, für einen Standort mit mehreren Basisstationen unterschiedlicher Betreiber eine gemeinsame, aber größer dimensionierte Stromversorgung zu verwenden.

Darüber hinaus muss für die freistehenden Anlagen eine Stromversorgung berücksichtigt werden, die als Übergabepunkt für den Anschluss der BTS/RNS an das Stromnetz errichtet werden muss. Bei Anlagen, die in Gebäuden untergebracht werden, werden auch noch zusätzliche Sicherungskästen und Stromzähler installiert.

³² Vergleichbar mit der RBS 2206 Ericsson, die ein Gesamtgewicht von 230 kg hat (Wilen o.J.).

³³ Nach Auskunft der Fa. Benning werden nahezu alle Stromversorgungssysteme für Basisstationen zusätzlich mit Bleibatterien für die Notstromversorgung ausgeliefert. Hr. Üssler, Telefonat am 12.2.2009.

Notstromversorgung der Basisstationen

Die Notstromversorgung wird nach Scharnhorst von ca. 17 Batterien pro Station (UMTS: 15) sichergestellt (ders. 2006:156 und 168). Die Fa. Benning bietet den Telekommunikationsunternehmen kombinierte Systeme zur Stromversorgung an. Hierbei wiegt der Batteriesatz für die Notstromversorgung ca. 150 kg. Verwendet werden Bleigel-Batterien. Lithiumionenbatterien werden aufgrund des hohen Preises noch nicht verwendet. Brennstoffzellen sind derzeit in der Erprobungsphase. Die Notstromversorgung mit Bleibatterien ist jedoch ein gewichtiger Kostenfaktor, weshalb diese bei den Basisstationen – so die Auskunft von Telefonica – nicht mehr die Regel sein wird. Bei den Netzbetreibern werden Basisstationen nur noch dann mit Notstrombatterien ausgestattet, wenn mehr als 9 Netzelemente – d.h. andere Basisstationen – mit dieser einen Basisstation vernetzt sind oder wenn an der Basisstation wichtige Richtfunkverbindungen hängen.

Kühlung der Basisstationen

Nach Scharnhorst soll auch die Kühlung redundant ausgelegt sein, so dass 1 bis 2 Kühleinrichtungen pro BTS bzw. RNS vorhanden sind.³⁴ Nach Auskunft von Telefonica gibt es inzwischen nur noch maximal eine Kühlanlage pro Basisstationen. Da die Kühlung für einen Großteil des Stromverbrauchs verantwortlich ist, gibt es inzwischen Anlagen, die mit Luftkühlung arbeiten. Langfristig werden diese Geräte sich durchsetzen.

Eine Klimaanlage für den Innenbereich – wie sie für die LCA von Emmenegger verwendet wurde – wiegt ca. 25 kg.³⁵ Hinzu kommt noch ein Kompressor. Hierbei ist die ungefähre Zusammensetzung ca. 9,7 kg Zinkblech (Gehäuse u.a.), 2,1 kg Kupfer (Kupfertuben, schätzungsweise 4 kg mit Motor³⁶), 2,3 kg Aluminium (Gussnaht), 1 kg Kühlmittel, 6,8 kg Kunststoffe und 2,5 kg für den Ventilatormotor (Kupfer und Metalllegierungen).³⁷ Die Kühlmittelmenge konnte nur geschätzt werden auf ca. 1 kg. Eine Klimaanlage für den Außenbereich wiegt ca. 47 kg. Hiervon entfallen ca. 19,4 kg auf Zinkblech (Gehäuse u.a., ca. 30 kg mit Kompressor), 3,4 kg Kupfer (Leitungen und Kupfertuben, ca. 8 kg mit Kompressor), 2,1 kg Aluminium (Gussnaht), 1 kg Kühlmittel, 1,5 kg Kunststoffe und 15 kg für den Kompressor (Stahl und andere Metalllegierungen).³⁸

Die Lebensdauer von Klimaanlagen wird von Emmenegger auf ca. 10 Jahre geschätzt (der. 2003:69). Es gibt jedoch keine Schätzung, wie viele BTS bzw. RNS im Innenbereich und wie viele im Außenbereich eingesetzt werden. Ebenso ist ungewiss, wie die Kühlung erfolgt, wenn mehrere Betreiber ihre BTS/RNS in einem Gebäude z.B. unter dem Dach untergebracht haben. Hierbei sollte nach Auskunft von Telefonica eine Kühlung ausreichen, um mehrere BTS/RNS bzw. den Raum zu kühlen.

Verkabelung der Basisstationen

Für die Verkabelung im Innern und im Außenbereich setzt Scharnhorst 20 bis 40 m Kabel an (ders. 2006:156 und 168). Unsicher ist, ob in diese Werte auch der Stromanschluss einberechnet ist und ob die Verkabelung die Stromversorgung und die Antennenkabel umfasst. Ebenso ist unsicher, ob hier auch die Verkabelung von Richtfunkverbindungen einberechnet ist. Dieser Wert wird jedoch insgesamt als zu niedrig angesehen, wie eine Besichtigung einiger Mobilfunkanlagen zeigte (vgl. auch Abbildung 5).

Kabel werden zudem in Kabelschächten, Kabelschienen oder Kabelträgern verlegt. Standardisierte Konstruktionen gibt es hierbei nicht, so dass sich alle Basisstationen unterscheiden. Bei der Installation von Antennen auf Flachdächern werden häufig Kabelschienen verwendet (vgl. auch Abbildung 5).

³⁴ Neuere Systeme kommen mit Luftkühlung aus.

³⁵ Hinsichtlich der Kühleinrichtungen gibt es nur wenige Informationen. Die Studie von Emmenegger ist die einzige ihrer Art, die das Thema Kühlung detaillierter behandelt.

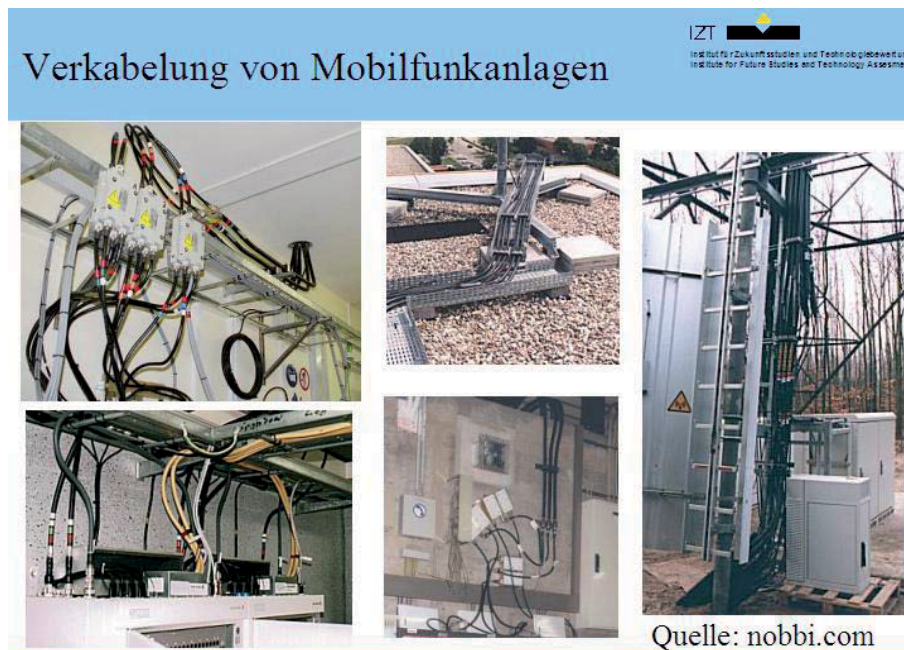
³⁶ Emmenegger setzt hier 4,7 kg an, da er den Motor als aus gänzlich Kupfer bestehend annimmt.

³⁷ Emmenegger 2003:69, Modell Indoor Unit Model 42vkc-18 von Swisscom Carrier.

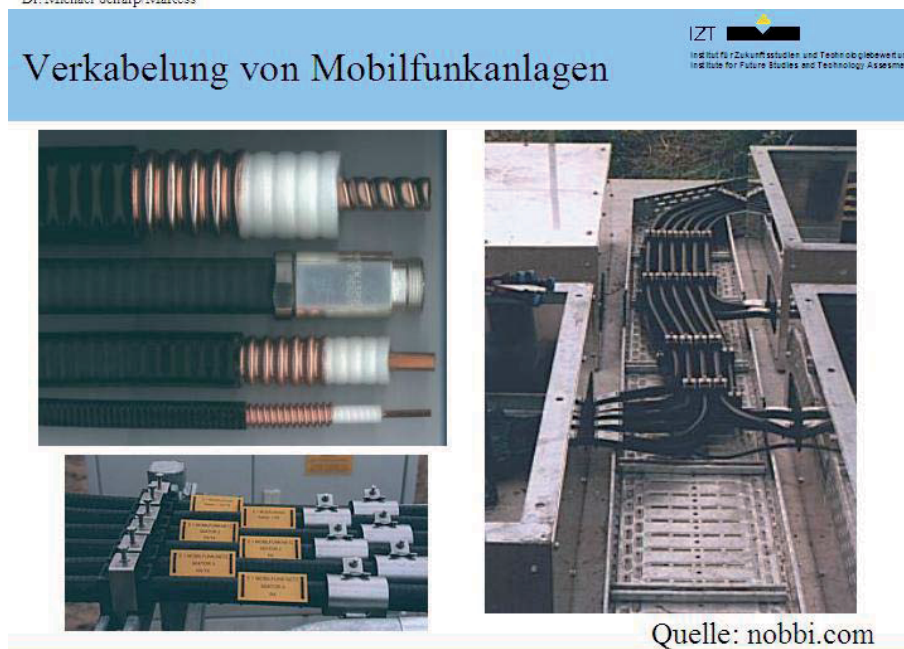
³⁸ Emmenegger 2003:72, Modell Outdoor Unit Model 38GL-18 von Swisscom Carrier.

Als Materialien kommen im Innenbereich Kunststoffgehäuse oder dünnwandiges verzinktes Blech zum Einsatz. Im Außenbereich wird nur letzteres verwendet.

Abbildung 5: Verkabelung von Mobilfunkstationen.



Dr. Michael Scharp/MaRes



Dr. Michael Scharp/MaRes

Quelle der Bilder: www.nobbi.com

Ein besonderes Problem sind Mobilfunkstationen, die außerhalb des bebauten Bereiches liegen wie z.B. an den Fernstraßen. Hierbei müssen Mobilfunkbetreiber mit hohen Wegelängen rechnen.³⁹ Für die freistehenden Basisstationen muss noch pro Station ein zusätzliches Stromverteilermodul angenommen werden. Dem liegt die Annahme zugrunde, dass die einzelnen Basisstationen an dem Mast – die zumeist von mehreren Betreibern an dem Mast aufgestellt werden – von der Verteilerstation versorgt werden müssen, da sie nicht unmittelbar an das Stromnetz angeschlossen werden.

³⁹ Persönliche Auskunft von o2.

Gehäuse von Basisstationen

Die Vermittlungstechnik der Basisstationen sind in Verteilerschränken (Racks) untergebracht (s.a. Abbildung 6). Wenn die Basisstationen im Freien stehen, werden sie manchmal in einem Gehäuse (Container) oder einem Massivgebäude untergebracht. In welchem Umfange Containerlösungen vorliegen oder auch kleinere Gebäude für große Stationen verwendet werden, ist nicht bekannt. Container-Lösungen haben den Vorteil der Standardisierung, der einfachen Aufstellung sowie eines hohen Einbruchschutzes. Wie die Abbildungen unten zeigen, können Stahlcontainer auch so verkleidet werden, dass sie Ähnlichkeiten zu kleinen Hütten haben.

Abbildung 6: Gehäuse von Mobilfunkstationen.



Quelle der Bilder: www.nobbi.com

Antennen der Basisstationen und Richtfunkverbindungen

Zur Basisstation gehören weiterhin die Antennen, welche zumeist mit einem kurzen Mast oder einer Halterung an oder auf einem Gebäude⁴⁰ befestigt sind. Hierbei können Sektorenantennen, die üblicherweise 120° abdecken oder seltener – ältere – Rundstrahlantennen verwendet werden.⁴¹ Zum Aufbau von Mikro- oder Pico-Zellen werden auch sehr kleine einzelne Antennen verwendet. Seit einiger Zeit werden angesichts knapper Antennenstandorte auch dual polarisierte Antennen verwendet, die beispielsweise zwei Frequenzbereiche (z.B. GSM 900 und 1800 oder GSM und UMTS-Frequenzen) oder sogar mehrere Bereiche (Multipol-Antennen) abdecken.

Nach Scharnhorst werden pro BTS ca. 6 Antennen bzw. pro RNS 3 bis 6 Antennen verwendet (ders. 2006:155 und 168). Nach Auskunft des Antennenherstellers Kathrein sind jedoch eher 3 Antennen für beide Standards die Regel.

Weiterhin bestehen auch teilweise Richtfunkverbindungen zwischen wichtigen Netzknoten, allerdings liegen hierzu kaum Informationen vor.

Das Gewicht von Mobilfunkantennen ist aufgrund diverser Anforderungen hinsichtlich der Leistung sehr unterschiedlich. Beispielsweise wiegen Mobilfunkantennen von RFS Radio Frequency Systems

⁴⁰ In Frage kommen auch Schornsteine oder Türme (Kirchtürme).

⁴¹ In verschiedenen Situationen werden auch sehr kleine Antennen für Mikrozellen verwendet.

oder von Kathrein zwischen 5 und 30 kg, wobei mittlere Werte bei GSM-Antennen bei RFS mit schätzungsweise 11 kg (APX-Serie von RFS) und UMTS-Antennen schätzungsweise 8 kg (APX und APXV-Serie von RFS) liegen. Die einfach polarisierten Antennen von Kathrein wiegen zwischen 4,5 (130 cm) und 10 kg (200 cm). Dual-Band-Antennen sind deutlich schwerer, so wiegt eine Kathrein-Antenne vom Typ 742 (130 cm) ca. 22 kg, Triple-Band-Antennen wiegen ca. 30 kg.

Antennen werden zunehmend mit Fernsteuerungseinheiten (Motoren, Remote Control Unit) ausgestattet, um den Absenkwinkel ferngesteuert einstellen können. Derartige Antennen benötigen dann eine Stromversorgungs- und Steuerungseinheit (CCU Central Control Unit oder PCU Portable Control Adapter). Bei UMTS soll dies nach Kathrein Standard sein, wohingegen GSM-Antennen eher zwischen 30 und 40 % steuerbar sein sollen. Eine RCU von Kathrein wiegt ca. 0,5 kg (Typ 860 10025). Das Gewicht der CCU liegt bei Kathrein zwischen 3,5 und 4,5 kg. Pro Antenne wird eine RCU verwendet, mehrere RCU werden durch eine CCU gesteuert.

Zum Antennenequipment gehören auch noch Verstärker (TMA Tower Mounted Amplifier), wobei die Ausstattung jedoch nach Auskunft von Kathrein vom Standort abhängig ist. Ein typischer Verstärker von Kathrein – DTMA UMTS 12 AISG – wiegt ca. 5 kg. Je Antenne wird ein Verstärker benötigt. Dazu werden noch weitere Komponenten benötigt wie Bias, DC-Stopps, 50- Ω -Loads, Stromverteiler sowie Befestigungsmaterialien. Das Gewicht der Befestigungsmaterialien wird von Kathrein auf ca. 10 kg pro Antenne geschätzt.

Das Gehäuse von Antennen ist zumeist aus Kunststoff (Fiberglass). Der Strahler bzw. die Reflektorwand sind aus Aluminium, verzinnem Kupfer, Kupferfolie oder Messing je nach Typ oder Anbieter.⁴² Nach Emmenegger enthält eine Mobilfunkantenne⁴³ für die Basisstationen ca. 1 kg Kupferkabel in Kabeln und Steckern. Mit einem Koaxialkabel wird die Verbindung zwischen Antenne und eigentlicher Basisstation hergestellt. Diese Verbindungsleitungen wiegen ca. 11 kg (Emmenegger 2003:21).

Abbildung 7: Halterungen für Antennen.



Quelle der Bilder: www.nobbi.com

⁴² Hinsichtlich der metallischen Anteile der Antennen konnten keine Informationen recherchiert werden.

⁴³ Den Antennentyp benennt Scharnhorst jedoch nicht.

Antennenmasten

Über die Verteilung der Antennen bzw. der Basisstationen hinsichtlich ihrer Stationierung auf bzw. in Gebäuden oder an freistehenden Masten gibt es für Deutschland keine Daten. Hierbei gilt bei Mobilfunkbetreibern das Prinzip, Antennen möglichst unauffällig zu platzieren. Deshalb werden heutzutage Antennen zumeist auf Gebäudedächern verankert. Für die Schweiz schätzte Emmenegger dieses Verhältnis auf 70 % der Basisstationen in Häusern mit Masten als Dachaufbauten und 30 % Basisstationen an freistehenden Standorten mit freistehenden Masten (Emmenegger 2003:13).

Freistehende Masten werden dort genutzt, wo schon Masten – zumeist aus der alten Postzeit – stehen bzw. wo sich keine großen Hemmnisse bei der Errichtung ergeben. Freistehende Basisstationen werden jedoch auch teilweise an vorhandene Infrastrukturen angebaut (Fernmeldetürme, Windenergieanlagen, Strommasten, Schornsteine, hohe Leuchten, Türme u.a.). Hierbei sind Gittermasten, Stahlrohrkonstruktionen oder Schleuderbetonmasten möglich. In neuerer Zeit werden sogar künstliche Bäume errichtet. Nur in Baden-Württemberg gibt es eine Mastkonstruktion aus Holz.

Die Mastkonstruktionen in Stahl-Gitterbauweise ähnlich denen von Stromleitungsmasten. Mittlere Masten für die Stromleitung wiegen zwischen 1 und 1,5 t (Höhe: 10 bis 15 m), große Masten für Hochspannung wiegen zwischen 5 und 6 Tonnen (Höhe 25 bis 30 m). Derartige Masten werden zumeist für zentrale Kommunikationsknoten eingesetzt, die dicht mit Antennen besetzt werden.

Für einfache Mobilfunkmasten sind die statischen Anforderungen geringer, wenn sie nur die leichten Antennen tragen. Hierbei können Stahlrohrmasten wie bei Flutlichtanlagen verwendet werden. Bei einer Höhe von 20 m wiegt ein Flutlichtmast ca. 675 kg (vgl. Stich 2008).

Allerdings gibt es noch wesentlich größere Mastkonstruktionen aus Stahl-Gitterwerk oder aus Beton mit deutlich höheren Massen. Über die Anzahl und Massen derartiger Masten gibt es jedoch keine Informationen.

Abbildung 8: Mastkonstruktionen.



Quelle der Bilder: www.nobbi.com

Standorte für Basisstationen werden häufig von den Netzbetreibern gemeinsam genutzt. Nach einer Analyse der Bundesnetzagentur für das Jahr 2004 ergab sich folgende Verteilung von Standorten, wobei jedoch keine Unterscheidung zwischen UMTS und GSM gemacht wird:

Tabelle 11: Standortmitnutzung von Mobilfunkanlagen (2004)

Element	Anteil
Standort mit einer Funkanlage	29 %
Standort mit zwei Funkanlagen	40 %
Standort mit drei Funkanlagen	19 %
Standort mit vier Funkanlagen	8 %
Standort mit fünf und mehr Funkanlagen	4 %

Quelle und Anmerkungen: Bundesnetzagentur (2004). Juli 2004 mit 51.108 Anlagen

Emmenegger schätzt die Lebensdauer der Masten auf 10 bis 15 Jahre (Emmenegger et al 2003:7). Dies könnte auf Mastkonstruktion auf Gebäuden zutreffen, allerdings ist bei freistehenden Mastkonstruktionen mit einer höheren Lebensdauer zu rechnen. Hierbei scheinen Werte von 50 Jahren für Betonmasten oder Stahlgittermasten durchaus plausibel (eigene Schätzung).

Blitzschutz

Alle Mobilfunkstationen müssen mit einem Blitzschutz nach den Blitzschutzklassen II oder III versehen sein (Weberskirch 2001). In der Unterverteilung an der BS werden Blitzstromableiter der Anforderungsklasse B und Überspannungsschutzableiter der Anforderungsklasse C eingesetzt. Als Blitzableiter wird vor allem verzinkter Stahl – aber auch Kupfer oder Aluminium - in Form von Rundleitungen eingesetzt. Diese bilden häufig umfangreiche Ableiterbahnen mit Halterungen auf den Dächern (s. Abbildung), die die Fangeinrichtungen (aufrecht stehende Stäbe oder Fangstangen neben den Antennen) miteinander verbinden. Fangeinrichtungen und Ableitungen haben unterschiedliche Querschnitte wie in der folgenden Tabelle aufgeführt:

Tabelle 12: Querschnitte von Fangeinrichtungen und Ableitung nach DIN Blitzschutznorm VDE 0185

Element	Fangeinrichtung	Ableitung	Gewicht Ableitung [kg/m]
Kupfer	35 mm ²	16 mm ²	0,48 kg
Stahl	50 mm ²	50 mm ²	1,23 kg
Aluminium	70 mm ²	25 mm ²	0,21 kg

Quelle: Brieselang o.J.

Zur Blitzschutzanlage gehört gleichfalls noch die Erdung, die durch die Verbindung der Blitzschutzanlage mit einem Erdableiter (z.B. Fundamenterder, Stahlstab im Fundament bis ins Erdreich) hergestellt wird. Weitere Elemente sind die Herstellung des Potentialausgleichs (häufig eine Metallschiene mit Anschluss des Nulleiters der Stromversorgung) und der Überspannungsschutz (Sicherungskasten), die jedoch mengenmäßig nicht besonders ins Gewicht fallen. Allerdings führt der Potentialausgleich vermutlich zu einem höheren Kabelbedarf der Elektroninstallation.

Abbildung 9: Blitzschutzkonstruktionen.

Quelle der Bilder: Weberskirch 2000.

2.1.2 Basisstationen Controller (BSC/RNC)

Die Anzahl der BSC/RNC bzw. der MSC lassen sich auch nur näherungsweise schätzen. Emmenegger geht von einem Verhältnis von 100 bis 150 Basisstationen zu einem RNC aus (Emmenegger 2003:9). Nach ISI/CECP beträgt das Verhältnis von BTS zu den BSC 1:220⁴⁴ und für UMTS besteht ein Verhältnis von 1 RNC zu 240 RNS. Nach Scharnhorst versorgt jede BSC – je nach Netzkonfiguration – 40 bis 100 BTS (ders. 2006:43). Das Forschungsvorhaben NIK geht von einem Verhältnis von 240 Basisstationen zu einer Vermittlungsstelle aus sowohl für UMTS als auch GSM (NIK 2004:42).⁴⁵ Ein Netzbetreiber gibt sein Verhältnis von Basisstationen zu Controller-Stationen mit 50 zu 1 an und verfügt über insgesamt 220 Controller-Stationen.⁴⁶ Nach Ericsson sollen allein im D2-Netz von Vodafone ca. 230 BSC für das GSM-Netz im Jahr 2000 vorhanden gewesen sein (ders. 2001:24).⁴⁷ Hierbei sind die RNC des UMTS-Netzes nicht eingerechnet. Versucht man auf dieser Basis die Anzahl der BSC/RNC zu berechnen, so ergeben sich die folgenden Werte:

⁴⁴ Im Rahmen der Befragung der Mobilfunkbetreiber durch ISI/CECP gaben zwei Betreiber an, dass zwischen 200 und 280 Basisstationen von einem Vermittlungsstandort gesteuert werden.

⁴⁵ Allerdings charakterisiert NIK diese Vermittlungsstellen als „MSC“, stellt diese jedoch auf eine Ebene mit den RNC. Es ist somit unklar, ob sich die Werte auf die BSC/RNC oder die MSC beziehen.

⁴⁶ Diese Auskünfte wurden unter der Bedingung genannt, dass die Netzbetreibernamen nicht genannt werden.

⁴⁷ BTS 13.000, Anzahl BSC 230 (Verhältnis 56 zu 1), Anzahl MSC 110 (Verhältnis: 2,1 zu 1)

Tabelle 13: Abschätzung der BSC/RNC (gerundet).

Element	GSM-BTS / BSC (untere Werte)	GSM-BTS / BSC (obere Werte)	UMTS-RNS / RNC (mittlere Werte)	Quelle
Anzahl BTS	60.000	70.000		1
40-100 BTS pro BSC	600-1.500	700-1.750		
Anzahl BTS/RNS	60.000	70.000	30.000	2
100-150 BTS/RNS pro BSC/RNC	400-600	470-700	200-300	
Anzahl BTS/RNS	60.000	70.000	30.000	3
240 BTS/RNS pro BSC/RNC	250	290	125	
Anzahl BTS/RNS	60.000	70.000	30.000	4
220 BTS pro BSC / 240 RNS pro RNC	270	320	125	
Anzahl BTS/RNS	60.000	70.000	30.000	5
50 BTS pro BSC / 50 RNS pro RNC	1.200	1.400	600	

Quelle und Anmerkung: Eigene Abschätzung auf Basis verschiedener Quellen. Die Schätzwerte für die BTS und RNS berücksichtigen die obigen Annahmen. 1 Scharnhorst 2006; 2 = Emmenegger 2003; 3 = NIK 2004:31; 4 = ISI/CEPC; 5 = Auskunft eines Netzbetreibers.

Insgesamt ergibt sich somit eine Spannbreite von 250 bis 1.750 BSC sowie von 125 bis 600 RNC. Zusammen ergeben sich zwischen 375 und 2.350 BSC und RNC. ISI/CEPC haben die Anzahl der Steuerungszentren (BSC und RNC) für das Jahr 2005 auf 370 geschätzt (zitiert nach NIK 2004:42). Es ist jedoch nicht anzunehmen, dass die oberen Werte von 2.800 BSC/RNC zutreffen werden, da die unteren Schätzwerte (40 bzw. 62 BTS pro BSC/RNC) für spezifische Verhältnisse gelten und zudem durch eine Verbesserung der Servertechnik heutzutage vielmehr BTS/RNS von einer BSC/RNC gesteuert werden können.

Hinsichtlich der Schätzung der Anzahl der Infrastrukturelemente ist diese breite Spanne jedoch nicht so gravierend wie sie zunächst erscheint. Ein BSC bzw. RNC ist im Prinzip nur ein größerer Steuerungsrechner mit einer komplexen Elektronik. Von der Größe und der Materialzusammensetzung vergleichbare Geräte werden in Rechenzentren in einem vielfach größeren Umfang eingesetzt. Moderne BSC wie der Nortel BSC 3000 können bis zu 500 BTS kontrollieren. Nach Scharnhorst können moderne RNC zwischen 180 und 750 RNS steuern (Scharnhorst 2006:49), ein Netzbetreiber gibt die mögliche Kapazität jedoch mit 1:512 an. Somit würden in einem – von der Geographie und Verteilung der BTS her optimalen Netz – ca. 140 BSC 3000 ausreichen, um ca. 70.000 Basisstationen zu managen.

Basisstationen Controller sind im Prinzip komplexe elektronische Geräte, die eine gewissen Ähnlichkeit mit Computerservern haben. Nach einer exemplarischen Untersuchung eines GSM-BSC Racks von Scharnhorst soll dieses ca. 270 kg wiegen, davon sind ca. 100 kg elektronische Bauelemente, 1,4 kg Kabel sowie ein Gehäuse von ca. 175 kg aus Aluminium und Stahl (ders. 2006:161). Eine UMTS-RNC wiegt nach Scharnhorst ca. 230 kg, davon sind ca. 31 kg elektronische Bauteile, 12 kg Ventilatoren, 1,4 kg Kabel, 22 kg Austauschmagazine, sowie 170 kg Gehäuse aus Aluminium und Stahl.

Nach Scharnhorst sind die BSC und RNC redundant ausgelegt. Jedes BSC und RNC sollen 3 bis 4 Racks enthalten (der. 2006:43 und 155), die zusammen den BSC bzw. RNC bilden. Nach Auskunft eines Mobilfunkbetreibers ist die Anzahl der Racks von der Ausbaustufe abhängig, d.h. wie viele Teilnehmer in den Funkzellen der angeschlossenen Basisstationen gleichzeitig telefonieren. Je Ausbaustufe des Netzbetreibers sollen 1 bis 2 Racks benötigt werden.

Nach Scharnhorst kommen zur BSC/RNC noch 1 bis 2 Kühlanlagen und die Innen- und Außenverkabelung (20 bis 40 m) hinzu, d.h. der Anschluss der BSC bzw. des RNC an das Festnetz bzw. ggf. an Richtfunkantennen.⁴⁸ Für die Verkabelung (Outdoor) nimmt Scharnhorst 20 m (GSM) bis 40 m (UMTS) an. Ungewiss hierbei ist, ob in diese Werte auch der Stromanschluss eingerechnet ist. Nach

⁴⁸ Sowohl BTS als auch BSC sind über Festnetz verbunden. Richtfunk wird dort eingesetzt, wo sich keine Kabelstrecken kostengünstig etablieren lassen.

Auskunft des Netzbetreibers haben BSC/RNC jedoch nur dann eine Kühlanlage, wenn sie eigenständig sind, was jedoch nur sehr selten der Fall sein soll. Die BSC/RNC wird deshalb zumeist von der Kühlanlage der Basisstation (BTS/RNS) mitgekühlt. Auf dieser Basis würde sich die folgende Geräteanzahl ergeben:

Tabelle 14: Equipment für BSC und RNC nach Scharnhorst und auf Basis der Auskunft eines Netzbetreibers.

Schätzung auf Basis der Daten von Scharnhorst	BSC GSM (unterer Wert)	BSC GSM (oberer Wert)	RNC UMTS (unterer Wert)	RNC UMTS (oberer Wert)
BSC / RNC (Standorte)	250 [3]	1.750 [1]	125 [4]	300 [2]
Racks (4 pro Station) [1]	1.000	6.000	500	1.200
Kühlanlagen (1-2 pro Station) ⁴⁹ [1]	250-500	1.750-3.000	125-250	300-600
Schätzung auf Basis der Daten eines Netzbetreibers	BTS GSM (unterer Wert)	BTS GSM (oberer Wert)	RNC UMTS (unterer Wert)	RNC UMTS (oberer Wert)
BSC / RNC (Standorte) [5]	600		300	
Racks (1 pro Station) [5]	600		300	
Kühlanlagen (keine) [5]	0		0	

Quelle: Eigene Berechnungen auf Basis verschiedener Literaturwerte. 1 Scharnhorst 2006:43 und 155; 2 = Emmenegger 2003; 3 = NIK 2004:31; 4 = ISI/CEPC; 5 = Eigene Berechnung auf nur der Minimalwerte Basis der Auskunft eines Netzbetreibers.

Im Ergebnis würden sich auf Basis der Angaben verschiedener Autoren zusammen für GSM und UMTS zwischen 1.500 und 7.200 Racks und zwischen 375 bis 3.600 Kühlanlagen ergeben. Auf Basis der Gespräche mit einem Netzbetreiber würden sich ca. 900 Racks und keine Kühlanlagen ergeben.

2.1.3 Mobile Switching Center (MSC)

Schätzungen der Anzahl der MSC

Ebenso wie bei dem Verhältnis der Basisstationen zu den BSC / RNC gibt es nur wenige Daten hinsichtlich des Verhältnisses der BSC / RNC zu den MSC. Nach Scharnhorst werden üblicherweise zwei BSC mit einem MSC verbunden (2006:44 und 144). Nimmt man dieses Verhältnis sowie die Schätzungen von Emmenegger, ISI/CEPC und NIK und setzt es in Bezug auf die in Tabelle 13 ermittelten Werte, so würde sich die folgende Anzahl von MSC ergeben:

Tabelle 15: Abschätzung der MSC (gerundet).

Element	GSM-BSC / MSC (untere Werte)	GSM-BSC / MSC (obere Werte)	UMTS-RNC / MSC (mittlere Werte)	Quelle
Anzahl BSC	600-1.500	700-1.750		1
Anzahl MSC	300-750	350-875		
Anzahl BSC/RNC	400-600	470-700	200-300	2
Anzahl MSC	200-300	230-350	100-150	
Anzahl BSC/RNC	250	290	125	3
Anzahl MSC	125	145	68	
Anzahl BSC/RNC	270	320	125	4
Anzahl MSC	135	160	68	

Quelle und Anmerkung: Eigene Abschätzung auf Basis verschiedener Quellen. Die Schätzwerte für die BSC und RNC berücksichtigen die obigen Annahmen. 1 Scharnhorst 2006; 2 = Emmenegger 2003; 3 = NIK 2004:31; 4 = ISI/CEPC.

Legt man die geschätzten Werte für das Verhältnis MSC zu BSC/RNC zugrunde, so würden sich zwischen 125 und 750 MSC für das GSM-Netz und ca. 70 (gerundet) bis 150 MSC für das UMTS-Netz ergeben. Der hohe Wert von Scharnhorst kann nicht zutreffen, es handelt sich eher um Stück-

⁴⁹ In der Beschreibung des Mobilfunksystems schätzt Scharnhorst die Anzahl der Kühlanlagen auf 1 bis 2 pro BSC (ders. 2006:44), nimmt jedoch als Berechnungsgrundlage für die LCA 2 Kühlanlagen (ders. 2006:155).

zahlen.⁵⁰ Da jedoch die MSC sowohl GSM als auch UMTS verwalten, führt dies nicht zu einer Doppelung der MSC, so dass nur die Maximalwerte zutreffen können und somit zwischen 350 (oberer Wert nach 2) und 125 (unterer Wert nach 3) MSC plausibel wären. Nach Auskunft eines Mobilfunkbetreibers ist die Anzahl der MSC in 2010 wie folgt: Vodafone und T-Mobile ungefähr 56, E-plus 15 und o2 14 MSC. Dies ergibt zusammen ca. 140 MSC. Die hohe Differenz zum Maximalwert von 350 MSC könnte sich zum einen aufgrund der Spanne der von den oben genannten Autoren zuvor geschätzten BSC und RNC ergeben, könnte aber auch darin begründet liegen, dass ggf. Geräteanzahlen – und nicht Vermittlungszentren – in den oben genannten Studien angesetzt wurden.

Ausstattung der MSC

MSC bestehen vor allem aus Kommunikationsservern, die die Gespräche vermitteln.⁵¹ Die Zusammensetzung von wichtigen elektronischen Geräten für eine MSC wurde von Scharnhorst exemplarisch ermittelt (ders. 2006:163). Nach Scharnhorst ist eine „MSC“ im Prinzip ein komplexes elektronisches Gerät, das eine gewisse Ähnlichkeit mit einem Computerserver hat. Nach Scharnhorst wiegt ein GSM-MSC Rack ca. 286 kg, davon sind ca. 85 kg elektronische Bauelemente (ISDN-Karten, Server, Gateway etc.), 10 kg Ventilator, 1 kg Kabel sowie ein Gehäuse von ca. 185 kg aus Aluminium und Stahl. Pro Mobile Switching Center sollen nach Scharnhorst 4 bis 6 Racks der oben genannten Konfiguration stehen sowohl im GSM- als auch im UMTS-Netz.

Die obige Einschätzung konnte durch eine Besichtigung und Gespräche mit Netzbetreibern nicht bestätigt werden, da die MSC eine Vielzahl von weiteren Geräten enthält. Eine MSC ist nicht nur ein Gerät, sondern besteht aus einer Vielzahl von Racks mit unterschiedlichen Funktionen. Beispiele hierfür sind:

- NSR, Routersystem, 2 Racks pro MSC;
- TRAU (Transcoding and Rate Adaptation Unit, vgl. ELKO o.J.), Signalumwandlung von 13kBit/s in 64 kBit/s, 8 Racks pro MSC⁵²;
- OSS, Main Array zur Netzwerküberwachung, 1 Rack pro MSC;
- Broadband Access Unit, Plattform zur Vernetzung von Sprach- und Datendiensten (Multiservice-Verwaltung von Diensten) für das UMTS-System, 3 Racks pro MSC;
- Media Gateway, Vernetzung von Sprach- und Multimediadiensten, 2 Racks pro MSC;
- Richtfunkvernetzung, 10 Racks pro MSC und
- GPS Clock, stellt die Uhrzeit für das Netz bereit, 1 Rack.

Darüber hinaus benötigt die MSC noch Kühlanlagen. Hierbei schätzt Scharnhorst, dass pro MSC (hier: Vermittlungsstelle) 4 bis 6 Kühlanlagen benötigt werden. In der LCA werden hierfür jeweils 8 Kühlanlagen pro MSC angesetzt. Eine Besichtigung einer MSC eines Netzbetreibers zeigte, dass die MSC über eine zentrale Kühlanlage mit 6 Racks verfügt.

Für die Verkabelung der MSC werden von Scharnhorst 40 m pro MSC (hier: GSM MSC Rack) angenommen (ders. 2006:170).

Eine MSC ist von sehr gewichtiger Bedeutung für das Mobilfunksystem, weshalb alle MSC mit eigener DC-Stromversorgung und Notstromversorgung ausgestattet sind.⁵³ Es liegen jedoch nur wenige Informationen über diese Ausstattung vor, so dass nur auf die Ergebnisse der Besichtigung einer mittleren MSC zurückgegriffen werden konnte. Die unterbrechungsfreie Stromversorgung (USV) wird

⁵⁰ Der Wert von Scharnhorst – auf 2 RNC eine MSC – ist mit Sicherheit falsch, hierbei muss es sich um Gerätezahlen handeln weshalb der obere Wert von ca. 900 MSC mit Sicherheit nicht zutreffend sein kann.

⁵¹ In der Literatur wird unter MSC häufig die Vermittlungsstelle als Teil des Network Switching System NSS verstanden. Häufig wird unter MSC auch eine elektronische Komponente zur Vermittlung der Gespräche verstanden.

⁵² Die Literatur ist hierbei nicht eindeutig, da vielfach die TRAU auf Basis der Controllerstationen angesiedelt werden. Entsprechend der Besichtigung einer MSC wird die TRAU bei der MSC verankert.

⁵³ Darüber hinaus werden für die Notstromversorgung bei längerem Netzausfall auch i.A. noch Dieselaggregate bereitgehalten, die jedoch in dieser Bilanzierung nicht aufgenommen worden sind.

durch vier USV-Anlagen für eine Stromversorgung mit 60 kVA sichergestellt. In der MSC eines Netzbetreibers ist diese in vier großen Schaltschränken untergebracht. Die Notstromversorgung wird über große Batterieanlagen sichergestellt. In der mittleren MSC des Netzbetreibers wird dies durch 96 Bleibatterien sichergestellt.⁵⁴

Datenbanksysteme und Schnittstellensystem im MSC

Neben den MSC gibt es noch weitere Datenbanken und Schnittstellensysteme, die an die MSC angebunden sind. Nach Scharnhorst ist jede MSC mit einer GMSC verbunden, die die Verbindung zwischen den MSC herstellt und auch die Teilnehmer lokalisiert.⁵⁵ Dies erfolgt durch die Nutzung verschiedener Datenbanken (VLR Visitors Location Register und HLR Home Location Register). Andere Datenbanksysteme wie das AuC Authentication Center und EIR Equipment Identity Register werden gleichfalls von den MSC genutzt. Darüber hinaus gibt es Schnittstellensysteme für die Datendienste (SGSN und GGSN) im GPRS- und EDGE-System (weiterentwickeltes GSM der 2,5-Generation)⁵⁶.

Von diesen Geräten hat Scharnhorst exemplarisch die Zusammensetzung von SGSN Racks und GGSN Racks für das GPRS-System untersucht (ders. 2006:167). Das exemplarisch untersuchte SGSN-Gerät wog 378 kg, davon sind ca. 9 kg Ventilatoren (3 St.), ca. 120 kg elektronische Bauelemente (ISDN-Karten, Server, Switch Units Router etc.), 1 kg Kabel sowie 202 kg Gehäuse für das Rack und die Server. Das GGSN-Rack wiegt ca. 293 kg, davon sind ca. 10 kg Ventilator, 102 kg der Server, 1 kg Kabel sowie 180 kg Gehäuse aus Aluminium und Stahl.

Nach Scharnhorst ist das Verhältnis von MSC zu GMSC 1:1 (ders. 2006:44). Ebenso sind nach Scharnhorst jeder MSC ein SGSN und ein GGSN zugeordnet. Allerdings legt Scharnhorst eine Redundanz der Systeme zugrunde, so dass pro MSC 1,5 Geräte angesetzt werden im Rahmen der LCA (ders. 2006:170). Eine Besichtigung einer MSC eines Netzbetreibers zeigte jedoch, dass in dieser mittleren MSC je 3 Racks für die GMSC und GGSN und 2 Racks für die SGSN vorkamen. Damit ergeben sich weite Spannbreiten je nachdem wie viele MSC man zugrunde legt und wie viele GMSC, GGSN und SGSN pro MSC vorhanden sind:

Tabelle 16: Equipment für das MSC – Schnittstellensysteme.

Anzahl MSC (Schätzwerte dieser Bilanzierung)	MSC (unterer Wert)	MSC (oberer Wert)
MSC	140	200
GMSC / SGSN/ GGSN (Faktor 1,5 gemäß Scharnhorst)	630	900
GMSC / SGSN/ GGSN (3 / 2 / 3 gemäß Besichtigung)	1.120	1.600

Quelle: Eigene Berechnungen auf Basis von Scharnhorst 2006:44 und 170 unter Annahme der Anzahl der MSC gemäß der Auskunft eines Netzbetreibers (s.Tabelle 15).

Über die Anzahl der Datenbanksysteme (HLR, VLR, EiR, AuR) liegen nur wenige Informationen vor insbesondere, ob sie in allen MSC oder nur in einigen der MSC vorhanden sind. Nach Auskunft eines Netzbetreibers gibt es in jeder MSC ein VLR. HLR, AuC und EiR sind gemeinsam untergebracht in den MSC. Unsicher ist, ob tatsächlich jede MSC diese Register besitzt oder nicht und wie viele Backup-Systeme es gibt, da diese Register die wichtigsten Kundendaten enthalten. Bei einer mittleren MSC sind HLR, AuC und EiR in 6 Racks untergebracht.

⁵⁴ Diese Informationen des Netzbetreibers wurden als vertraulich eingestuft, weshalb der Name nicht genannt werden darf.

⁵⁵ Hierbei besteht eine gewisse Unsicherheit. Lecke beschreibt dies so: „alle MSCs sind an einem Gateway Mobile Switching Center (GMSC) angeschlossen, welcher pro Mobilfunkanbieter genau einmal (mit redundanten Servern zur Steigerung der Ausfallsicherheit) existiert“ (ders. 2004:3). Somit wäre nach Lecke ein GMSC vorhanden für alle MSC. Eine eigene Besichtigung zeigte jedoch, dass die GMSC eher als Racks zu sehen sind, die mehrfach in den MSC vorhanden sind.

⁵⁶ UMTS wird als Mobilfunk der 3. Generation bezeichnet. Die EDGE-Technologie schafft den Übergang von GSM zu UMTS.

2.1.4 Operation and Maintenance Center (OMC/NMS)⁵⁷

Während die Basisstationen, die Basisstationen-Controller und die MSC die unmittelbare Mobilfunk-ebene mit der Abwicklung der Gespräche betreffen, sind die OMC Operation and Maintenance Center für die Steuerung und Wartung des Netzes zuständig. Über das OMC werden auch die Software-Einspielungen bei allen Systemkomponenten vorgenommen. Hierbei soll das OMC-B für die Basisstationen-Controller und das OMC-S für die MSC zuständig sein. Im OMC sind alle Kundendaten hinterlegt in den Datenbanken EIR und AuC.⁵⁸ Dem OMC ist das NMC Network Management Center übergeordnet, welches die Koordinierung der regionalen OMC übernimmt. Das NMC ist zumeist in einem OMC angesiedelt.

Über die Ausstattung der OMC's, ihre Anzahl und die Ausstattung des NMC gibt es nur sehr wenige Informationen. Es ist naheliegend, das OMC mit einem Rechenzentrum zu vergleichen, da nahezu alle Tätigkeiten computergestützt erfolgen. Der Bundesstaat Virginia hat eine Ausstattungsliste für ein spezielles Mobilfunknetz in Virginia veröffentlicht. Hierbei wird zwischen dem NOC Network Operation Center und einzelnen Regionalzentren unterschieden. Die Ausstattung umfasst:

Tabelle 17: Ausstattung eines NOC für die Steuerung eines Mobilfunknetzes.

Element	NOC	Headquarters	Anmerkung
RGU Radio Gateway Units	1	16	ca. 5 kg (geschätzt)
WS-GU Work Station Gateway Units	1	16	ca. 5 kg (geschätzt)
OMC-Server	1		ca. 35 kg mit Zubehör
SIP Session Initiation Protocol Server	1		ca. 35 kg mit Zubehör
Ethernet Switches	2	16	ca. 5 kg (geschätzt)
Dispatch PC's	1	16	ca. 15 kg (geschätzt)
ACP Administrative Control Panel	2		(1 x Reserve)
Firewall Server	1		ca. 35 kg (geschätzt)

Quelle: Commonwealth of Virginia 2007 und Motorola o.J.

2.1.5 Administration

Für die Administration⁵⁹ konnten drei Elemente identifiziert werden (Ericsson 2001:2):

- Über den Service Control Point werden Dienste für den Nutzer aktiviert. Beispiele sind fremdbezahlte 0800-Nummern oder Kreditkartengespräche.
- Das Service Order Gateway (SOG) verbindet das Switching-System mit der Administration. Hier kann das Freischalten oder Sperren der Teilnehmer erfolgen.
- Das Billing Gateway erfasst gebührenrelevante Daten. Es kann an ein MSC oder ein SOG angeschlossen werden.
- Zur Abwicklung dieser Dienste werden vor allem Computerarbeitsplätze und Server benötigt. Über deren Umfang gibt es jedoch kaum Informationen.

2.2 Weitere Mobilfunknetze

Neben dem GSM- und UMTS-Netz für den privaten Bereich gibt es noch zwei weitere Netze, die von der Bahn sowie von Bund und Ländern errichtet werden.

BBOS und BOS

Seit einigen Jahren wird von Bund und Ländern ein Mobilfunksystem für den „Behördenfunk“ aufgebaut. Genutzt wird dieser Behördenfunk für die Polizei, Feuerwehr, Rettungskräfte, den Zoll und den Katastrophenschutz (THW). Umgesetzt wird das System von der BBOS Bundesanstalt für den

⁵⁷ OMC werden in Literatur auch als Network Management Center (NMC) bezeichnet.

⁵⁸ Allerdings wurden diese Datenbanken schon oben im MSC abgeschätzt, weshalb sie hier nicht wieder erscheinen.

⁵⁹ In der Literatur wird die Administration häufig auch unmittelbar zum OMC zugerechnet, was durchaus möglich ist. In dieser Studie wird jedoch zwischen OMC und Administration unterschieden.

Digitalfunk der Behörden und Organisationen für Sicherheitsaufgaben. Der Mobilfunk trägt den „Namen“ BOS - Behörde für Organisation und Sicherheitsaufgaben. Er beruht auf dem TETRA-Standard. Geplant sind für BOS ca. 3.600 bis 4.000 Basisstationen, die jedoch zur Zeit noch im Aufbau sind. Bis Ende 2008 war in ca. 9 der 45 Netzabschnitte BOS im Aufbau und für 27 in der Planungsphase. Im Rahmen des BOS-Systems sollen zudem 62 Vermittlungsstellen, vier Transitstellen sowie 2 Netzwerkmanagementcenter⁶⁰ aufgebaut werden (BBOS o.J.).

Betrachtet man die Zahl der Basisstationen, so würden sich als Equipment für den Betrieb des Netzes zwischen 17 und 100 RNC sowie 8 bis 50 MSC⁶¹ mit zusätzlichen Geräten für die Datenbanken und ggf. GMSC ergeben.

GSM-R (Global System for Mobile Communications – Rail(way))

Zur sicheren Kommunikation innerhalb des Bahnnetzes wurde seit einiger Zeit ein eigenes Mobilfunknetz in Deutschland (und anderen europäischen Staaten) nach einem einheitlichen Standard aufgebaut um den bisherigen analogen Zugfunk abzulösen. Neben der Sprachkommunikation soll GSM-R vor allem auch der Zugsicherung dienen. Ein wichtiger Unterschied des verwendeten Systems ist die Priorisierung und Verdrängung von Rufen. Hierdurch ist es möglich, dass in speziellen Situationen Notrufe (z.B. medizinischer Notfall im Zug) und Anweisungen zur Zugbeeinflussung (z.B. sofortiges Anhalten des Zuges auf freier Strecke) alle anderen Rufe verdrängen können. GSM-R ist ein europäisch interoperables Mobilfunknetz und wird bei dem Internationalen Eisenbahnverband (Union Internationale des Chemins de fer, UIC) als EIRENE (European Integrated Railway Radio Enhanced Network) Projekt geführt.

Die Deutsche Bahn hat mit dem Aufbau 1999 begonnen. Bis Ende 2004 war die erste Ausbaustufe mit 2.400 Basisstationen abgeschlossen (Burkhardt und Eisemann 2005). Zusätzlich zu den Basisstationen sollten noch 63 BSC/RNC⁶², sieben Vermittlungen, und 4 Operation & Maintenance Center (OMC) – davon eins als Network Management Center (NMC) – aufgebaut werden (Wikipedia: GSM-R). Bis 2007 war GSM-R entlang von mehr als 24.000 Streckenkilometern in Betrieb. Weiterhin wurden rund 10.000 Fahrzeuge für GSM-R ausgerüstet. Ebenso wurde das GSM-R Netz für den Rangierfunk auf einigen Rangierbahnhöfen eingeführt (geplant ca. 1.400 Bahnhöfe).

Betrachtet man die Zahl der Basisstationen, so würden sich als Equipment für den Betrieb des Netzes zwischen 100 und 600 RNC sowie 50 bis 300 MSC⁶³ mit zusätzlichen Geräten für die Datenbanken und ggf. GMSC ergeben.

Mobilfunk und WLAN Wireless Local Area Network

Seit einiger Zeit werden in häufig frequentierten Zonen (Flughäfen, Bahnhöfen, Hotels, Universitäten etc.) sogenannte WLAN Wireless Local Area Networks eingerichtet. Im Jahre 2005 gab es in Deutschland ca. 6.000 WLAN Hotspots (tns-Infratest 2007:156). In diesen Zonen ist es möglich, drahtlos mit einem Laptop ins Internet zu gehen. WLAN und Mobilfunk unterscheiden sich im Prinzip nur in der Frequenz. Seit einigen Jahren gibt es Versuche wie z.B. von Nokia, das WLAN auch für den Mobilfunk nutzbar zu machen. So ist es möglich, mit dem Nokia 6136 sowohl im GSM-Netz zu telefonieren als auch über Voice over IP über das Internet zu telefonieren.

⁶⁰ Bei den „Transitstellen“ und „Vermittlungsstellen“ handelt es sich um reale Gebäudekomplexe, so dass diese nicht mit den RNS oder MSC verglichen werden können.

⁶¹ Verhältnis RNS/RNC: 40/1 bzw. 240:1 sowie RNC:MSC 2/1.

⁶² Hierbei besteht die Unsicherheit, ob es sich um BSC oder RNC handelt.

⁶³ Verhältnis RNS/RNC: 40/1 bzw. 240:1 sowie RNC:MSC 2/1.

2.3 Sekundäre Infrastruktur des Mobilfunks

Neben den oben genannten Infrastrukturbestandteilen gibt es noch eine sekundäre Infrastruktur für den Betrieb des Mobilfunknetzes, die allerdings gewissen Ähnlichkeit zu anderen Netzen hat und deshalb nicht in die spezifische Infrastrukturabschätzung einfließt. Sie wird deshalb nur kursorisch benannt, da sie nicht in die Szenarien für die Massenbilanz einfließt:

- Gebäude – Betrieb des Netzes: Der Betrieb des Mobilfunknetzes setzt natürlich voraus, dass entsprechende Räumlichkeiten für den Betrieb der Infrastruktur bereitgehalten werden. Basisstationen werden entweder auf Dächern, in Dachräumen oder anderen Räumen eines Gebäudes untergebracht. Ebenso ist die Aufstellung im Freien neben Gebäuden möglich. Basisstationen-Controller werden zumeist in Gebäuden untergebracht. Größere Räumlichkeiten benötigen die MSC, in denen auch das Personal der Mobilfunkbetreiber ihre Arbeitsplätze hat.
- Gebäude – Vertrieb der Geschäftsleistungen: Die Mobilfunkanbieter haben im großen Umfange in Kooperation mit Vertriebspartnern Räumlichkeiten erstellt oder angemietet, um ihre Leistungen zu vertreiben. Angesichts der doch überschaubaren Infrastruktur für das Mobilfunknetz (vgl. Kap. 3.3) kann davon ausgegangen werden, dass der Ressourcenaufwand für den Vertrieb deutlich höher ist als für das Netz selber.
- IKT-Infrastruktur: Der Betrieb eines Mobilfunknetzes ist noch mit einer hohen sekundären IKT verbunden. Unter primärer IKT kann hierbei das Computernetzwerk zur Wartung und Steuerung des Mobilfunknetzes verstanden werden. Unter sekundärer IKT können hierbei die notwendigen Systeme zur Erbringung der Geschäftstätigkeit verstanden werden. Diese sind vor allem im SCP, SOG und BG verankert.
- Brandschutztechnik: Rechenzentren wie die MSC benötigen eine spezielle Brandschutztechnik, da sich der Einsatz von leitfähigen Löschmitteln verbietet und auch höhere Anforderungen an die schnellere Detektion von entstehenden Bränden vorhanden sind. In Frage kommen u.a. Gaslöschanlagen mit CO₂ oder Stickstoff, bessere mechanische Abschottungen der Systeme (Brandschutztüren) sowie Branddetektion mit Infrarot. Eine mittlere MSC eines Netzbetreibers verfügt über ca. 100 Gasflaschen mit Stickstoff..
- Stromversorgung: Rechenzentren für den Mobilfunk benötigen genauso wie Steuerungszentren für Energienetze höhere Anforderungen an die Stromversorgung, die innerhalb sehr geringer Zeiten die Stromversorgung sicherstellt bis mechanische Versorgungssysteme anspringen. Die Stromversorgung durch Ersatzaggregat wird nicht berücksichtigt.⁶⁴ In der Bilanzierung sind jedoch die Notstromversorgung sowie die DC-Stromversorgung berücksichtigt.
- Alarmanlagen: Die MSC der Mobilfunkbetreiber sind sehr sicherheitssensible Bereiche, weshalb sie mit speziellen Alarmanlagen ausgestattet sind.
- Vernetzung mit Festnetztechnik: Die Vernetzung von Mobilfunk mit ISDN erfolgt über die verschiedenen Schnittstellensysteme, die in der Bilanzierung berücksichtigt sind. Darüber hinaus gibt es noch eine Vernetzung mit der Festnetztechnik. Die dazu benötigte Ausstattung – wie z.B. große Rangierverteiler – wurden bei der Ressourcenabschätzung nicht berücksichtigt, da sie in den Festnetzbereich fallen.

⁶⁴ Beispielsweise verfügt eine mittlere MSC über zwei Dieselmotoren von 390 kVA und 700 kVA.

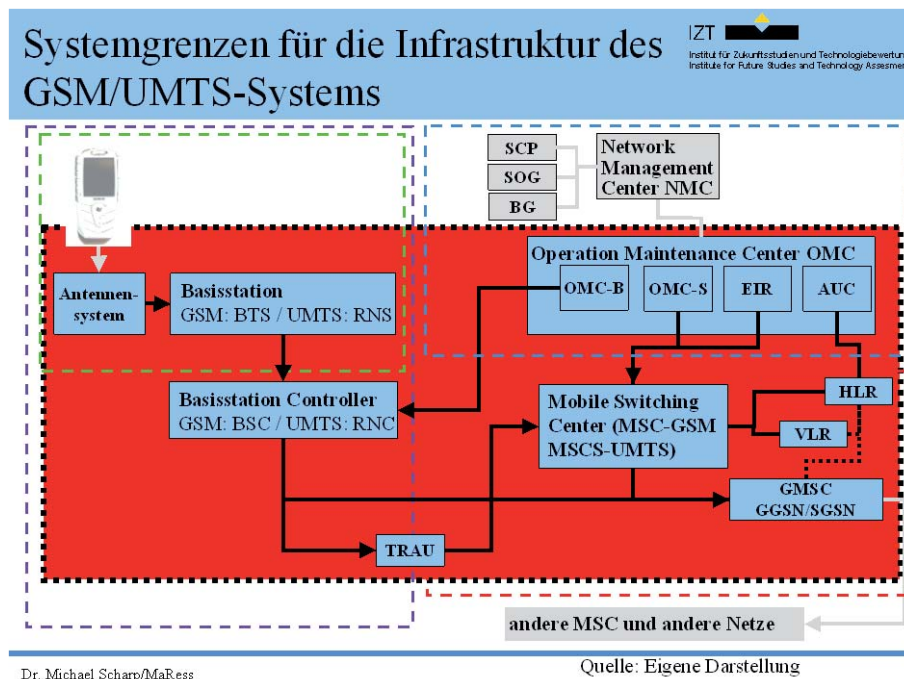
3 Abschätzung der Ressourcenintensität des Mobilfunknetzes

Zur groben Abschätzung der Ressourcenintensität des Mobilfunknetzes müssen einige Annahmen getroffen werden. Diese werden im nachfolgenden Kapitel aufgeführt. Anschließend erfolgt eine kursorische Abschätzung der Massenbilanz soweit dies auf der Grundlage der vorhandenen Daten möglich ist.

3.1 Systemgrenzen

Die Systemgrenzen für die Abschätzung der Infrastruktur umfassen die Basisstationen, die Controller-Stationen, die Mobile Switching Center und die Operation Maintenance Center. Nicht einbezogen in diese Bilanzierung werden das Network Management Center als Schnittstelle zwischen dem operativen Kundenbereich und der Netztechnik sowie die Kundenzentren (SCP Service Control Point, SOG Service Order Gateway und BG Billing Gateway). In der folgenden Abbildung sind die Systemgrenzen dargestellt:

Abbildung 10: Systemgrenzen zur Abschätzung der Infrastruktur für den Mobilfunk



3.2 Annahmen für die vier Ebenen des Mobilfunksystems

3.2.1 Base Station Subsystem

Basisstationen – Anzahl und Standorte

Ein Schätzung sowohl der Anzahl der Basisstationen, der Anzahl der Standorte und auch der Verteilung auf GSM und UMTS ist sehr schwierig, da hierzu keine validen Daten vorliegen. Auf der einen Seite lässt sich die Anzahl der BTS und der RNS innerhalb eines gewissen Rahmens gut genug abschätzen. So dürften die Basisstationen für das GSM-Netz zwischen 60.000 bis 70.000 Stück, die Anzahl der Basisstationen für das UMTS-Netz dürfte für den Zeitraum 2006 bis 2008 zwischen 30.000 bis 36.000 Stück liegen. Drei Probleme sind jedoch hier relevant:

1. Zum einen werden Standorte von mehreren Mobilfunkbetreibern gemeinsam genutzt. Dies bedeutet, dass bestimmte bauliche Elemente wie Blitzschutz, Masten, Elektroverteilung und Kühlung nicht in doppelter oder mehrfacher Anzahl vorhanden sind. Es gibt jedoch keine Unterscheidung, in wie weit sich die rechnerisch ermittelbaren Werte zwischen UMTS- und GSM-Basisstationen verteilen lassen.
2. Zum anderen ist davon auszugehen, dass ein größerer Teil der UMTS-Anlagen in den BSC-Standorten integriert ist, wobei jedoch unklar ist, welcher Anteil dies umfasst.⁶⁵
3. Für das erste Quartal 2009 hat die Bundesnetzagentur die Zahl der UMTS-Basisstationen mit 39.000 angegeben, also 3.000 mehr als oben angenommen. Hierbei ist zum einen zu berücksichtigen, dass UMTS und GSM wenn möglich an einem Standort zusammengefasst werden, d.h. die zusätzlichen Stationen könnten in vorhandene GSM-Stationen integriert sein. Zum anderen verwenden die Netzbetreiber inzwischen duale Systeme, die sowohl UMTS als auch GSM übertragen können. Bei diesem dualen Ausbau werden die GSM-Stationen im Prinzip aufgelöst. Da die BNA hierzu aber keine Aussage macht, wird der neuere Wert der BNA für die UMTS-Stationen nicht verwendet.

Um eine Überschätzung der Ressourcenbilanz zu vermeiden – dies wäre der Fall wenn die Mehrfachnutzung der Standorte nicht berücksichtigt werden würde – muss die Standortzahl für BTS und RNS geschätzt werden. Die Anzahl von BTS und RNS sollte zwischen 90.000 und 106.000 liegen. Hieraus würden sich rechnerisch zwischen ca. 50.000 und 60.000 Standorte für beide zusammen ergeben entsprechend der Standortmitnutzung für das Jahr 2004 (vgl. Tabelle 11). Die Summe der BTS und der RNS sollte diese Werte somit nicht überschreiten. Eine Verteilung dieser Werte auf Basis des geschätzten Verhältnisses von BSC zu RNC müsste jedoch berücksichtigen, dass viele UMTS-Standorte in GSM-Standorte integriert sind, aber GSM – und deshalb die BSC – flächendeckend Deutschland abdecken. Hingegen müssen eine unbestimmte Anzahl von UMTS-Stationen aufgrund der geringeren Reichweite zwecks einer Flächenabdeckung eines Netzgebietes separat untergebracht werden, da nicht genug GSM-Stationen vorhanden sind. Es gibt jedoch keine Information, wie sich die Standorte auf GSM und UMTS verteilen. Deshalb wird die Verteilung der Standortzahl sowohl für die ermittelten Anlagenzahlen für die BTS und RNS übernommen als auch für die Minimal- und Maximalwerte der UMTS bzw. GSM-Basisstationen. Hierdurch ergibt sich die folgende Abschätzung:⁶⁶

Tabelle 18: Standortmitnutzung von Mobilfunkanlagen (2004) und Umrechnung auf die Standortzahlen in 2008 [Anzahl]

	Standorte	Anlagenzahl	GSM Min.	GSM Max.	UMTS Min.	UMTS Max.
Gesamtanzahl (Schätzung)			60.000	70.000	30.000	36.000
Standort mit einer Funkanlage	29 %	1	17.400	20.300	8.700	10.440
Standort mit zwei Funkanlagen	40 %	2	12.000	14.000	6.000	7.200
Standort mit drei Funkanlagen	19 %	3	3.800	4.433	1.900	2.280
Standort mit vier Funkanlagen	8 %	4	1.200	1.400	600	720
Standort mit fünf und mehr Funkanlagen	4 %	5	480	560	240	288
Summe (Standorte, gerundet)			35.000	41.000	17.000	21.000

Quelle: Eigene Berechnungen auf Basis der Schätzung der Anlagenzahl und der Standortverteilung gemäß Bundesnetzagentur 2004.

⁶⁵ Eine genauere Analyse hätte vielleicht durch die Auswertung des Infrastrukturatlases der Bundesnetzagentur erzielt werden können, aber dies war im Rahmen des Vorhabens nicht möglich, da die Bundesnetzagentur die Datenbank nicht für wissenschaftliche Zwecke zur Verfügung stellt sondern nur für Kommunen, in denen eine Standortplanung erforderlich ist.

⁶⁶ Nicht abschließend konnte hier die Frage geklärt werden, in welchem Umfang tatsächlich singulär nur für UMTS-genutzte Standorte vorhanden sind. Üblicherweise werden UMTS-Stationen in GSM-Stationen untergebracht, aber UMTS konzentriert sich auf die dichteren Siedlungsräume, in denen es mehr RNS als BTS gibt.

Basisstationen – Racks

Die Anzahl der Racks pro BTS bzw. RNC wurde von Scharnhorst im Rahmen seiner LCA auf 2-3 geschätzt. In der Berechnung der LCA-Daten wurden jedoch für jede BTS nur 2 Racks und für jede RNS nur 1 Rack angenommen. Eine Besichtigung und Gespräche mit einem Mobilfunkbetreiber in 2009 zeigten, dass heutzutage eher je ein Rack für GSM und UMTS verwendet werden. Inzwischen werden auch Systeme eingeführt, die sowohl UMTS als auch GSM gleichzeitig verarbeiten, so dass nur noch ein Rack – in Abhängigkeit von der Netzbelastung – notwendig wäre. Insbesondere diese Netzbelastung – d.h. wie viele Teilnehmer maximal gleichzeitig innerhalb der Funkzelle telefonieren können – macht die Abschätzung der notwendigen Technik sehr schwierig. Für die Abschätzung wird deshalb der Auskunft des Mobilfunkbetreibers gefolgt, dass pro BS nur ein Rack jeweils für UMTS und GSM notwendig ist. Dieser Wert könnte den Bestand an Racks unterschätzen, jedoch wird die Einführung dualer Systeme darauf hinauslaufen, dass dieser Wert erreicht werden wird.

Für die Massenbilanz der Racks werden die Werte von Scharnhorst (ders. 2006:155f) übernommen, da diese im Rahmen einer Besichtigung einer BTS bzw. RNS als plausibel eingeschätzt werden konnten. Dies bedeutet für eine GSM 900 Basisstation eine Masse von 220 kg und für ein UMTS-Rack 240 kg.

Bei den Racks werden das Gehäuse und die darin eingeschlossene Technik unterschieden. Entsprechend der Untersuchungen von Scharnhorst wird bei den Racks ein Verhältnis der Massen von Gehäuse zu Technik von 75:25 angesetzt.

Basisstationen – Stromversorgung

Für die DC-Stromversorgung wurde angenommen, dass diese individuell für jedes Racks erfolgt (Bezug: Anlagenanzahl). Für die Stromversorgung wurde ein Gleichrichtermodul Slimline 500 der Fa. Benning angenommen in Form des Einschubs (Gewicht 1 kg). Hierbei besteht die Unsicherheit, ob die DC-Stromversorgung schon in die Masse der „Technik“ bei Scharnhorst integriert ist oder nicht. Im Rahmen dieser Abschätzung wurde angenommen, dass dies nicht der Fall ist, so dass eine eigene DC-Stromversorgung zusätzlich zu der Rack-Technik hinzugerechnet wurde.

Für die freistehenden Basisstationen (geschätzte 30 %) wird noch ein zusätzliches Stromverteilermodul – in Anlehnung an einen Hausanschluss – pro Station angenommen. Diesem liegt die Annahme zugrunde, dass von der Verteilerstation die einzelnen Basisstationen an dem Mast – der zumeist von mehreren Betreibern zusammen genutzt wird – versorgt werden. Das Gewicht dieser Verteilerstation wird auf 100 kg geschätzt. Für in Gebäuden installierte Basisstationen wird zusätzlich ein Stromverteiler – d.h. Sicherungskästen und Stromzähler – mit einem Gewicht entsprechend der Angaben von Installationsfirmen mit 20 kg angenommen. Der Bezug bei freistehenden und in Gebäuden installierten Anlagen sind jeweils die Anzahl der Standorte.

Basisstationen – Notstromversorgung

Nach Scharnhorst ist jede Basisstation mit einer Notstromversorgung ausgestattet, nach Auskunft eines Mobilfunkbetreibers erhält eine Basisstation nur dann einen Batteriesatz, wenn mindestens 10 BTS bzw. RNS an diesem Knoten hängen bzw. wenn es sich um eine BTS/RNS mit wichtigen Richtfunk-Verbindungen handelt.⁶⁷ Ungewiss ist, wie die Netzbetreiber die Notstromversorgung an gemeinsam genutzten Standorten sicherstellen, da nicht jeder gemeinsam genutzter Standort für alle Netzbetreiber gleich wichtig ist. Eine zweite Unsicherheit ergibt sich durch die reinen UMTS-Basisstationen, da hier ungewiss ist, ob diese auch in „längeren Ketten“ zusammengeschaltet sind oder beispielsweise eine bestimmte Anzahl von UMTS-Stationen an eine GSM-Basisstation angeschlossen ist, in der sich die RNC befindet. Da dieses Problem sich nicht lösen lässt, wird geschätzt,

⁶⁷ Telefonische Auskunft eines Mobilfunkbetreibers.

dass die Notstromversorgung (Batterien) der Basisstationen maximal 10 % aller bzw. minimal 20 % aller Standorte betrifft.

Die Dimensionierung der Notstromversorgung wird auf Basis einer Herstellerankunft (Fa. Benning) berechnet. Für die Abschätzung wird entsprechend der Herstellerankunft davon ausgegangen, dass der Batteriesatz ca. 150 kg wiegt.

Basisstationen – Kühlung

Scharnhorst, der eine Ökobilanz zum Mobilfunk erstellt hat, schätzt dass je BTS/RNS zwischen einer und zwei Kühlanlagen verwendet werden (ders. 2006:155). Für seine Ökobilanz verwendet er den unteren Wert, d.h. eine Kühlanlage je BSC/RNC (ders. 2006:170). Weiterhin ist für die Dimensionierung der Kühlanlagen nach Scharnhorst wichtig, ob es sich um freistehende Basisstationen oder Basisstationen in Gebäuden handelt. Da keine Daten darüber vorliegen, wie viele Basisstationen in Gebäuden – und damit wird die Vermittlungstechnik meistens unter dem Dach untergebracht – und wie viele freistehend sind, wurden die Verhältnisse für die Schweiz übernommen. Emmenegger schätzt, dass 70 % der BTS/RNS auf Häusern und 30 % an freistehenden Masten stehen (Emmenegger 2003:13). Da die Annahme von Scharnhorst – eine Kühlung pro BTS bzw. RNS (vgl. ders. 2006:170) – mit der Auskunft eines Netzbetreibers übereinstimmt, wird dieser Wert übernommen. Problematisch ist jedoch, wenn von mehreren Netzbetreibern ein gemeinsamer Standort betrieben wird. Hierbei wird davon ausgegangen, dass es nur eine Raumkühlung für die Basisstation gibt, da unabhängige Raumkühlungen von mehreren Betreibern an einem Standort keinen Sinn machen. Der Bezugswert ist deshalb die Anzahl der Standorte. Für die Massenbilanz werden die Massen der Kühlanlagen für den Innenbereich mit 25 kg und für den Außenbereich von ca. 50 kg benutzt (Emmenegger 2003:69/72). Als Bezugswert wird die Anzahl der Standorte gewählt.

Basisstationen – Verkabelung

Für die Verkabelung der Basisstationen auf Gebäuden mit den Antennen und zur Stromversorgung wurden von Scharnhorst 40 m Kabel pro BTS angenommen (ders. 2006:170).⁶⁸ Nach Auffassung der Verfasser dieser Studie müssen höhere Werte angenommen werden, da die Verkabelung Antennenkabel, Stromkabel, Steuerungskabel für die Antennenmotoren sowie Kabel zur Herstellung des Potentialausgleichs umfassen. Eine Besichtigung von Basisstationen in und auf Gebäuden zeigte (vgl. auch Abbildung 5), dass aufgrund der Stromeinspeisung im Keller und der Aufstellung der Antennen auf dem Dach häufig lange Wegstrecken mehrfach zu überbrücken sind. Aus diesem Grunde werden als unterer Wert 100 m und als oberer Wert 200 m Kabellänge pro Basisstation in Gebäuden angenommen. Bezugswert ist hierbei die Anlagenanzahl, da die Signalkabel der Betreiber getrennt werden und auch die Stromversorgung mit getrennten Kabeln ab dem Verteilerkasten erfolgt.

Für die Verkabelung von freistehenden Antennen müssen gleichfalls höhere Werte als von Scharnhorst angesetzt werden. Dies lässt sich modellhaft zeigen. Werden an einem 20 Meter hohen Mast nur 3 Sektorantennen befestigt, so müssen mindestens 6 Signalleitungen, 3 Leitungen zur Steuerung des Antennenmotors und 1 Leitung für die Stromversorgung gezogen werden. Zusammen wären dies 200 m Leitung. Dieser Wert wird als unterer Wert genommen, als oberer Wert werden 300 Meter genommen. Bezugswert ist hierbei gleichfalls die Anlagenanzahl.

Weiterhin sind eine Vielzahl von Basisstationen und auch von Controller-Stationen mit Richtfunkverbindungen ausgestattet. Es liegen keine Informationen vor, in welchem Umfange Richtfunkverbindungen existieren, weshalb davon ausgegangen wird, dass das Verhältnis von Richtfunkstrecken zu Basisstationen 1:10 beträgt.⁶⁹ Für die Verkabelung der Richtfunkstrecken (Antennenkabel und

⁶⁸ Nach Scharnhorst werden 20 bis 40 Meter verwendet, in seiner LCA geht er für alle Stationen von 40 m aus.

⁶⁹ Dies bedeutet nicht, dass 10 % der Basisstationen mit Richtfunkstationen ausgestattet sind, sondern dass die BSC/RNC, die MSC sowie wichtige Netzknoten mit Richtfunkverbindungen ausgestattet sind.

Stromanschluss) werden als unterer Wert 3 mal 20 Meter (60 m) und als oberer Wert 6 mal 20 Meter (120 m) geschätzt. Bezugswert ist die Anzahl der Standorte.

Fernmelde-, Rechner-, Koaxial- und Datenleitungen für den Innenbereich haben Kabelgewichte von 70 bis 1.000 kg/km (vgl. TKD o.J. und RFS o.J.). Antennenkabel (Feeder-Kabel) für den Mobilfunk von RFS wiegen zwischen 70 (8 mm Durchmesser) und 1.700 kg/km (60 mm Durchmesser). Abbildungen von Kabeln für Mobilfunkanlagen zeigen, dass hierbei die ganze Spannbreite der Durchmesser genutzt wird (vgl. Abbildung 5). Es wird deshalb für eine Abschätzung von Kabelgewichten für den Antennenanschluss und den Stromanschluss von 800 kg/km als Mittelwert bei einer Gebäudemontage ausgegangen (vgl. Faber o.J.).⁷⁰ Bei freistehenden Anlagen zeigen Abbildungen (vgl. Abbildung 5), dass hier vor allem die größeren Kabel vorliegen. Deshalb wird hier von einem mittleren Gewicht von 1.200 kg/km ausgegangen sowohl für die interne und externe Verkabelung. Für einen externen Stromanschluss wird von Kabelgewichten von 3.000 kg/km ausgegangen (Starkstromkabel). Der Bezugswert ist hierbei die Anzahl der Anlagen.

Kabel werden zumeist in Kabelschächten, Kabelschienen oder Kabelträgern verlegt. Über die Menge des verwendeten Materials gibt es kaum Informationen. Es wird deshalb angenommen, dass 20 % aller Stationen mit umfangreicheren Schienensystemen mit einer Masse von 250 kg und 80 % der Basisstationen mit einem Schienensystem von 50 kg aus verzinktem Stahl ausgerüstet sind. Der Bezugswert ist hierbei die Anzahl der Standorte.

Darüber hinaus wird auch noch ein zusätzlicher Bedarf für den Stromanschluss freistehender Masten angenommen. Allerdings werden nicht alle freistehenden Masten fernab von Stromleitungen aufgestellt. Im ländlichen Raum stehen sie meist nahe von Gebäuden oder zu Straßen. Für den zusätzlichen Stromanschluss werden für ein Fünftel der freistehenden Masten zusätzliche Kabellängen von 500 m Erdkabel angenommen.⁷¹ Der Bezugswert ist hierbei die Anzahl der Standorte.

Basisstationen – Zusätzliche Gehäuse (Container)

Über die zahlenmäßige Verwendung von Containern oder Gebäuden für die Aufstellung der Basisstationen ist nichts bekannt, außer dass diese Lösungen manchmal verwendet werden. Es wird deshalb angenommen, dass ein Fünftel aller freistehenden Basisstationen – d.h. 6 % aller Basisstationen – in Containern untergebracht ist. Ein 8-Fuß Container aus Stahl wiegt ca. 750 kg. Der Bezugswert sind die Anzahl der Standorte, da in einem Container mehrere Basisstationen unterschiedlicher Netzbetreiber untergebracht werden können.

Basisstationen – Antennen

Nach Scharnhorst werden GSM-Stationen mit durchschnittlich 6 Antennen, UMTS-Stationen mit 3 Antennen ausgestattet (der. 2006:155 und 168). Nach Kathrein werden heute eher 3 Sektorenantennen verwendet. Hierbei besteht die Schwierigkeit, dass sowohl einfach polarisierte Antennen als auch Dual- oder Triple-Band-Antennen benutzt werden. Diese sind zwar deutlich schwerer, aber dafür benötigt eine Basisstation nur 3 anstelle von 6 Antennen wenn zwei Frequenzbereiche abgedeckt werden. Es wird deshalb die Annahme getroffen, dass je Basisstation 3 Antennen mit einem unteren Gewicht von 6 kg und einem oberen Gewicht von 12 kg verwendet werden. Kleinere Standorte mit weniger und leichteren Antennen (Mikrozellen) würden unter dem unteren Wert liegen, Standorte mit Dual-Band oder Tripel-Band-Antennen würden über dem oberen Wert liegen auch wenn sie mit weniger Antennen (3 statt 6 oder 3 statt 9) auskommen. Der Bezugswert ist die Anzahl der Basisstationen.

⁷⁰ Hierbei können durchaus leichtere Kabel für die Innenverkabelung und schwerere für die Außenverkabelung genutzt werden.

⁷¹ 30 % Gesamtanteil aller Basisstationen werden als freistehend angenommen, davon 20 % der Basisstationen mit längerer Stromversorgung, d.h. 6 % aller Basisstationen.

Für alle UMTS-Antennen wird angenommen, dass sie mit einer motorischen Steuerung versehen sind (RCU). Bei den GSM-Antennen wird ein Anteil von 30 % angenommen. Hierbei wird eine RCU Typ 860 10025 von Kathrein mit 500 g Gewicht pro Antenne angenommen. Für die CCU (Central Control Unit) wird ein Gewicht von 4 kg angenommen (pro Basisstation). Da die CCU mehrere Antennen ansteuern kann, werden hierbei bei GSM 10 % der Basisstationen angesetzt unter der Annahme, dass die 30 % ferngesteuerten GSM-Antennen insgesamt 10 % der Standorte ausmachen. Bei UMTS wird eine CCU pro Standort angesetzt. Ebenfalls wird je Antenne ein Verstärker mit einem Gewicht von 5 kg angenommen (Kathrein DTMA UMTS 12 AISG). Weitere elektrische und elektronische Bauteile sind Bias (1,3 kg), DC-Stops, 50-Ω-Loads und Stromverteiler (250 g) mit einem geschätzten Gesamtgewicht von 5 kg. Das Gewicht der Befestigungsmaterialien wird von Kathrein auf 10 kg geschätzt. Der Bezugswert ist die Anzahl der Basisstationen.

Basisstationen – Richtfunkverbindungen

Zusätzlich bestehen zwischen vielen Basisstationen noch Richtfunkverbindungen, auch wenn die Kommunikation zumeist über einen Festnetzanschluss zwischen den verschiedenen Ebenen des Mobilfunknetzes erfolgt. Hierbei wird angenommen, dass auf 10 % aller Basisstationen eine Richtfunkantenne vorhanden ist. Der Bezugswert ist die Zahl der Standorte.

Das Gewicht dieser Antenne wird auf 5 kg geschätzt. Zusätzlich wird das notwendige Befestigungsmaterial (verzinkter Stahl) auf jeweils 10 kg geschätzt pro Antenne. Analog der GSM/UMTS-Antennen werden je Antenne eine RCU, ein Verstärker sowie weitere Elektroteile mit einem Gesamtgewicht von 10 kg pro Antenne angenommen, wobei untergliedert wird in 5 kg Elektronik und 5 kg Elektrik (Schätzung). Eine CCU wird hierbei nicht angenommen, da diese in 10 % aller GSM-Standorte und 100 % aller UMTS-Standorte schon angesetzt wurde.

Basisstationen – Masten

Über die Verteilung der Anzahl von Basisstationen auf Gebäuden oder als freistehende Masten liegen keine Informationen vor, weshalb zunächst die Verteilung entsprechend der Schweiz aufgegriffen wird (70 % auf Gebäuden, 30 % freistehend).

Für die Masten der Basisstationen in Gebäuden werden 200 kg verzinkter Stahl pro Basisstation angesetzt (vgl. auch Abbildung 7). Bei den Mastkonstruktionen von freistehenden Anlagen (30 % der Basisstationen) wird folgende Verteilung angesetzt:

- 10 % der Antennen werden an vorhandene Infrastruktur angebaut (Annahme: Ständerwerk und Halterung mittels verzinktem Stahl, 50 kg pro Basisstation).
- 15 % der Antennen werden mit leichten Stahlrohrmasten errichtet (Annahme: 20 m Mast, 700 kg verzinkter Stahl inklusive Antennenhalterungen).
- 5 % aller Basisstationen befinden sich an Stahl-Gittermasten (Annahme: bis 30 m, Gewicht 6 Tonnen).

Nicht berücksichtigt werden hierbei große Betonmasten, die zumeist noch aus der Zeit stammten, als die Telekom noch alleiniger Betreiber von Richtfunk war. Eine weitere Unterschätzung könnte bei den gemeinsam genutzten Standorten auf Gebäuden liegen. Beispielsweise werden auf Flachdächern oft mehrere Mastkonstruktionen der verschiedenen Netzbetreiber installiert. Ob dies mit der obigen Annahme von 200 kg pro Mastkonstruktion auf einem Gebäude ausreichend ist, kann nicht eingeschätzt werden. Der Bezugswert für die Masten ist die Anzahl der Standorte.

Basisstationen – Blitzschutzeinrichtung

Hinsichtlich der Massen für den Blitzschutz liegen keine Angaben vor, da diese von Anlage zu Anlage verschieden sind. Sie können nur abgeschätzt werden unter Berücksichtigung verschiedener Typen von Basisstationen. Hierbei werden folgende Annahmen getroffen:

- 20 % aller Basisstationen werden als auf Flachdächern stehend angenommen. Hierbei können ein umfangreiches Leiterbahnnetz sowie mehrere Fangmasten vorliegen. Dieses Netz wird mit 50 m angenommen.
- Für die restlichen 80 % aller Basisstationen wird eine einfachere Blitzschutzeinrichtung von 20 m Ableitung angenommen inklusive der Fangeinrichtung.
- Als obere Werte der Massen der Blitzschutzeinrichtung werden die Gewichte von Stahl (1,25 kg/lfm) und als unterer Wert das Gewicht von Aluminium (0,25 kg/lfm) angenommen.
- Für alle Basisstationen werden die Befestigungsmaterialien (Halteklammern, Ständer von Fangeinrichtungen, Erdungsanschluss, ggf. eigene Masten als Fangeinrichtungen) sowie Materialien für den Potentialausgleich in der Größenordnung zwischen 30 und 60 kg angenommen (verzinkter Stahl).
- Für die Verkabelung der Blitzschutzeinrichtung mit der Elektroninstallation werden zusätzliche Leitungen von 10 m (unterer Wert) bis 20 m (oberer Wert) angenommen. Wie bei der Elektroverkabelung werden Kabelgewichte von 800 kg/km angenommen.
- Für die Elektroinstallation der Blitzschutzanlage werden 1 kg Elektrik und Gehäusematerialien angenommen.

Der Bezugswert für die Blitzschutzeinrichtungen ist die Anzahl der Standorte.

3.2.2 Radio Subsystem

Basisstationen-Controller (BSC/RNC)

Die Zahl der BTS/RNS pro BSC/RNC wird in der Literatur auf eine breite Spanne von 40 bis 240 Basisstationen pro Controller-Station geschätzt. Modernste RNC – die in 2010 verfügbar waren – können bis zu 512 Basisstationen vernetzen. Für eine Abschätzung der Mobilfunkinfrastruktur wird hier eine Spannbreite von 50 bis 100 BTS/RNS pro Controller-Station angenommen. Begründen lässt sich der obere Wert mit der stetigen technologischen Entwicklung und Modernisierung der Mobilfunkinfrastruktur, d.h. es werden Controller verwendet, die zahlreiche Basisstationen anbinden können sowie der deutschlandweiten Abdeckung des Mobilfunksystems, bei dem auch die Flächenländer versorgt werden und somit mehr Controller-Stationen notwendig sind als in dichten Ballungsräumen. Der untere Wert orientiert sich an den Auskünften von Ericson und einem Netzbetreiber. Bezugswert ist die Anzahl der Standorte, da alle BSC/RNC fast ausschließlich an einer Basisstation angedockt sind.

Als Equipment werden nur Racks, Kühlanlagen, die Verkabelung, die DC-Stromversorgung und eine Notstromversorgung (s.u.) angenommen. Weitere Bauteile werden nicht angenommen, da die BSC/RNC über die Ausstattung der Basisstationen versorgt werden, d.h. Stromverteiler, Antennen, Blitzschutz oder Masten werden nicht zusätzlich hinzugerechnet.

Basisstationen-Controller (BSC/RNC) - Racks

Nach Scharnhorst (ders. 2006:170) werden je BSC/RNC 4 Racks verwendet. Nach Auskunft eines Mobilfunkbetreibers werden je Ausbaustufe 1 bis 2 Racks benötigt. Es werden deshalb als unterer Wert 1 Rack und als oberer Wert 4 Racks angenommen.

Für die Massenbilanz werden die Werte von Scharnhorst verwendet. Hierbei wurden für ein GSM-BSC Rack 270 kg angesetzt. Ein UMTS-RNC Rack wiegt ca. 230 kg. Bei den Racks wird das Gehäuse und die darin eingeschlossene Technik unterschieden. Entsprechend der Untersuchungen von Scharnhorst wird bei den Racks ein Verhältnis von Gehäuse zu Technik von 75:25 angesetzt.

Basisstationen-Controller (BSC/RNC) – Kühlung

Scharnhorst, der eine Ökobilanz zum Mobilfunk erstellt hat, schätzt dass je BSC/RNC zwischen einer und zwei Kühlanlagen verwendet werden (ders 2006:155). Für seine Ökobilanz verwendet er den unteren Wert, d.h. eine Kühlanlage je BSC/RNC (ders. 2006:170). Nach Auskunft eines Netzbetreibers sind alle BSC/RNC an einer Basisstation untergebracht und werden durch die Kühlung der

Basisstation mitversorgt. Es werden deshalb als unterer Wert 0, d.h. die Kühlung der BSC/RNC erfolgt durch die BTS/RNS und ist dort schon berücksichtigt, und als oberer Wert eine Kühlanlage pro BSC/RNC gerechnet (eigenständige Kühlung auch wenn sie zusammen mit den BTS/RNS untergebracht sind). Es wird weiterhin davon ausgegangen, dass Basisstationen-Controller in Gebäuden untergebracht werden, weshalb Innenkühlanlagen angenommen werden. Entsprechend der Studie von Emmenegger wiegt eine Kühlanlage für eine BTS im Innenbereich ca. 25 kg. Der Bezugswert ist die Anzahl der RNC bzw. BSC-Standorte.

Basisstationen-Controller (BSC/RNC) – Strom- und Notstromversorgung

Nach Auskunft eines Mobilfunkbetreibers gibt es für die Racks einer Controllerstation nur eine DC-Stromversorgung. Nach Scharnhorst wird diese – im Gegensatz zu den Racks der Basisstationen – nicht explizit in der Ökobilanz aufgenommen (vgl. Kap. 2.1.2). Als unterer Wert wird somit eine gemeinsame DC-Stromversorgung und als oberer Wert 4 (durchschnittliche Anzahl der Racks pro BSC/RNC) angesetzt. Hierbei wird ein TEBECHOP-Modul 3000 HD der Fa. Benning zugrunde gelegt mit einem Gewicht von 3 kg (Benning o.J.:5). Der Bezug ist hierbei die Anzahl der Racks (oberer Wert) bzw. der Stationen (unterer Wert).

Über die Notstromversorgung mit Batterien liegen keine Daten vor. Controllerstationen sind jedoch wichtige Schnittstellen im Netz, da sie die Basisstationen vernetzen. Es wird deshalb angenommen, dass analog der Basisstationen jede BSC/RNC eine Notstromversorgung mit Batterien hat. Diese wird analog der Basisstationen auf 150 kg geschätzt. Hierbei könnte eine Übergewichtung vorkommen, da Controllerstationen fast immer in Basisstationen untergebracht werden und (wie oben dargestellt) angenommen wird, dass 10 % aller Basisstationen über eine Notstromversorgung verfügen. Über diese Notstromversorgung kann auch die BSC/RNC laufen. Deshalb wird die Annahme getroffen, dass der untere Wert 0 % ist (BSC/RNC immer an Basisstationen mit eigener Notstromversorgung) und der obere Wert gleich 10 % ist (zusätzlich zu 10 % der Basisstationen haben auch alle BSC und RNC eine Notstromversorgung). Der Bezug ist hierbei die Anzahl der Standorte.

Basisstationen-Controller (BSC/RNC) - Verkabelung mit BTS/RNS

Entsprechend der Einschätzung von Scharnhorst (ders. 2006:170) werden je BSC 20 m und je RNC 40 m Verkabelung (Outdoor) angenommen. An den BSC/RNC sind auch zumeist Richtfunkverbindungen angeschlossen, aber eine Schätzung ihrer Mengenbilanz wurden dort schon berücksichtigt, so dass sie hier nicht aufgenommen werden müssen (s.o.). Für die Kabelgewichte werden 1.200 kg/km angesetzt. Der Bezug ist hierbei die Anzahl der Standorte.

Mobile Switching Center – Anzahl der Vermittlungsstellen

Die Spannweite der Schätzungen verschiedener Autoren hinsichtlich der Anzahl der MSC für das GSM-Netz liegt zwischen 125 und 350⁷² Stationen wenn man berücksichtigt, dass das UMTS-Netz keine eigenständigen MSC haben, sondern diese in das MSC-System des GSM-Netzes integriert sind. Diese hohe Differenz in der Literatur erklärt sich vermutlich aufgrund der Spanne der zuvor geschätzten BSC und RNC. Nach Auskunft eines Mobilfunkbetreibers liegt die Anzahl der MSC (hier: Vermittlungsstellen) in Deutschland bei ca. 140. Dieser Wert wird als unterer Wert angenommen. Als oberer Wert werden 200 MSC geschätzt und somit eine Abweichung von ca. 50 % nach oben hin angesetzt.

⁷² Ein noch höherer Wert wird von Scharnhorst unter der Annahme von 2 RNC auf je eine MSC berechnet mit 900 MSC. Dieser Wert ist mit Sicherheit falsch, hierbei muss es sich um Gerätezahlen handeln. Der obere Wert von ca. 900 MSC kann mit Sicherheit nicht zutreffen.

3.2.3 Network Switching System

Mobile Switching Center

Im Rahmen der Besichtigung der MSC konnten weitere Systeme erfasst werden, die zur Netztechnik gezählt werden. Diese sind:

- NSR, Routersystem, 2 Racks pro MSC,
- TRAU (Transcoding and Rate Adaptation Unit, vgl. ELKO o.J.), Signalumwandlung von 13kBit/s in 64 kBit/s, 8 Racks pro MSC⁷³,
- OSS, Main Array zur Netzwerküberwachung, 1 Rack pro MSC,
- Broadband Access Unit, Plattform zur Vernetzung von Sprach- und Datendiensten (Multiservice-Verwaltung von Diensten) für das UMTS-System, 3 Racks pro MSC,
- Media Gateway, Vernetzung von Sprach- und Multimediadiensten, 2 Racks pro MSC,
- Richtfunkvernetzung, 10 Racks pro MSC,
- GPS Clock, stellt die Uhrzeit für das Netz bereit, 1 Rack.

Es liegen kaum Informationen über die Gewichte der obigen Systembestandteile vor, weshalb auf die Abschätzungen von Scharnhorst für eine „MSC“ zurückgegriffen wird (ders. 2006:170). Entsprechend dieser Einschätzung wird für die Racks eine Masse von 300 kg zugrunde gelegt. Bei den Racks werden das Gehäuse und die darin eingeschlossene Technik unterschieden. Entsprechend der Untersuchungen von Scharnhorst wird bei den Racks ein Verhältnis von Gehäuse zu Technik von 75:25 angesetzt.

Mobile Switching Center – Kühlanlagen

Scharnhorst geht von 8 Kühlanlagen je MSC aus, die Besichtigung einer mittleren MSC eines Netzbetreibers zeigte, dass diese MSC mit 6 Kühlanlagen auskam. Für die Abschätzung werden als unterer Wert 6 und als oberer Wert 8 Kühlanlagen genommen. Bezugswert ist die Anzahl der Basisstationen.

Bei den Kühlanlagen handelt es sich um eher große Racks, so dass nicht entsprechend der Studie von Emmenegger die Gewichte der dort analysierten kleineren Kühlanlagen – die sich auf die BTS bzw. BSC beziehen – verwendet werden können. Es wird deshalb geschätzt auf Basis der Besichtigung der MSC eines Netzbetreibers, dass jedes Rack der Kühlanlage 300 kg wiegt.

Mobile Switching Center – Verkabelung

Scharnhorst geht von 40 m pro Rack aus. Eine Besichtigung einer mittleren MSC – die auf ca. 500 qm untergebracht ist, lässt diesen Wert nur für die interne Verkabelung der Racks plausibel erscheinen.⁷⁴ Angesichts der Vielzahl der elektronischen Geräte und der Größe der MSC werden deshalb Kabellängen von 100 bis 200 m je Rack angenommen. Bei den Kabelgewichten werden Werte von 800 kg/km angenommen, die um ein Drittel unter denen von Basis- bzw. Controllerstationen liegen. Diese Werte erscheinen aufgrund der Besichtigung plausibel.

Mobile Switching Center – Datenbanksysteme

Die Datenbanksysteme gehören zur Netztechnik. Aufgrund unzureichender Informationen ist die Abschätzung der Datenbanksysteme sehr schwierig. Deshalb werden die Werte einer mittleren MSC als Grundlage genommen. Hierbei lag ein VLR mit einem Rack sowie sechs Racks, in denen die HLR, AuC und das EiR untergebracht waren, vor. In Anlehnung an die anderen Server Racks wird von einem Gewicht von 300 kg pro Rack ausgegangen, wobei sich die Massen von Gehäuse und Elektronik auf 75:25 wie bei den anderen Systemen verteilen. Der Bezugswert ist die Anzahl der MSC.

⁷³ Die Literatur ist hierbei nicht eindeutig, da vielfach die TRAU auf Basis der Controllerstationen angesiedelt werden. Entsprechend der Besichtigung einer MSC wird die TRAU bei der MSC verankert.

⁷⁴ Jedes Rack enthält zahlreiche Einschübe mit elektronischen Bauteilen.

Mobile Switching Center – Schnittstellensysteme

Die Schnittstellensysteme gehören zur Netztechnik. Für die Abschätzung der Schnittstellensysteme wird auf die Abschätzung des unteren Werts von Scharnhorst mit dem Faktor 4,5 Racks pro MSC zurückgegriffen (ders. 2006:170), d.h. pro MSC werden 1,5 GMSC, 1,5 SGSN und 1,5 GGSN angesetzt. Für den oberen Wert wird auf die Besichtigung einer MSC zurückgegriffen, in der je 3 Racks für die GMSC und GGSN und 2 Racks für die SGSN vorkamen. Auch wenn die besichtigte MSC nur eine mittlere Größe hatte sollen diese Werte als obere Werte dienen da sie höher als die Werte von Scharnhorst sind.

Für die Massenbilanz werden die Annahmen von Scharnhorst übernommen (ders. 2006:167f.). Hiernach wiegt eine SGSN-Einheit ca. 380 kg und eine GGSN ca. 290 kg. Aufgrund der Besichtigung einer MSC wird letzterer Wert auch für die GMSC verwendet. Die Massenverteilung wird in Anlehnung an Scharnhorst mit 75 % für Gehäuse und 25 % für Elektronik angenommen.

Mobile Switching Center – Stromversorgung und Notstromversorgung

Für die Ressourcenabschätzung wird eine USV mit 60 kVA zugrunde gelegt, die für Rechenzentren ausgelegt ist (Typ Galaxy PW, MGE o.J.). Diese USV wiegt 540 kg.⁷⁵ Für die Ressourcenbilanz wird angenommen, dass zwischen 4 und 8 USV je MSC vorhanden sind. Die Notstromversorgung wird über Bleibatterien sichergestellt. Für die Ressourcenbilanz werden Batterien für Telekommunikations-einrichtungen von Oerlikon angesetzt (Oerlikon 2007). Der Typ 2CP1000 wiegt ca. 75 kg. Eine Besichtigung einer mittleren MSC zeigte eine Ausstattung mit 96 Batterien des oben genannten Typs. Als unterer Wert werden 60 Batterien und als oberer Wert 200 Batterien angesetzt. Die nominale Gebrauchsdauer bei Raumtemperatur im Dauerladebetrieb wird von Oerlikon mit 15 Jahre angegeben.

3.2.4 Operation and Maintenance Subsystem

Bei der Abschätzung des OMS wird nur das OMC Operation Maintenance Center betrachtet, da über Network Management Center keine Informationen vorliegen. Über das OMC wird das Funknetz gesteuert und gewartet. Die Informationen über die Ausstattung und Anzahl im Mobilfunknetz sind jedoch sehr spärlich. Ein Netzbetreiber äußerte sich, dass das OSS nur wenige Workstations umfasst. Zur Abrundung der Bilanzierung der Infrastruktur soll jedoch eine grobe Schätzung mit einfließen, um zumindest innerhalb der Netzinfrastruktur beurteilen zu können, ob es sich um gewichtige Positionen handelt. Hierzu wird auf die Ausstattung eines NOC Network Operation Centers in Virginia zurückgegriffen (vgl. Tabelle 17). Ein weiteres Problem ist, dass keine Informationen über regionale Strukturen hinsichtlich der OMC und NMC der Netzbetreiber vorliegen. Es ist jedoch zu vermuten, dass eine größere Anzahl von Basisstationen auch mit einem größeren Technikeinsatz einhergeht. Für die Abschätzung werden folgende Annahmen getroffen:

- Die Ausstattung eines OMC wird analog des NOC von Virginia angenommen.
- Für die großen Mobilfunkbetreiber werden je 2 OMC und die kleinen Mobilfunkbetreiber werden je 1 OMC angenommen (gesamt 6 OMC).
- Jeder Netzbetreiber hat einen Gerätesatz als Reserve (gesamt 4 OMC).

Somit ergeben sich die folgenden Stückzahlen:

⁷⁵ Die USV kann mit einem Batterieschrank verbunden werden, der je nachdem, wie lange eine Stromautonomie sichergestellt werden soll. Die hierbei beschriebenen Produkte können die USV 10 oder 30 Minuten sicherstellt. Da die besichtigte MSC über ein eigenes Batteriesystem verfügte, wird dies nicht beim USV sondern separat aufgeführt.

Tabelle 19: Ausstattung der OMC für die Steuerung eines Mobilfunknetzes.

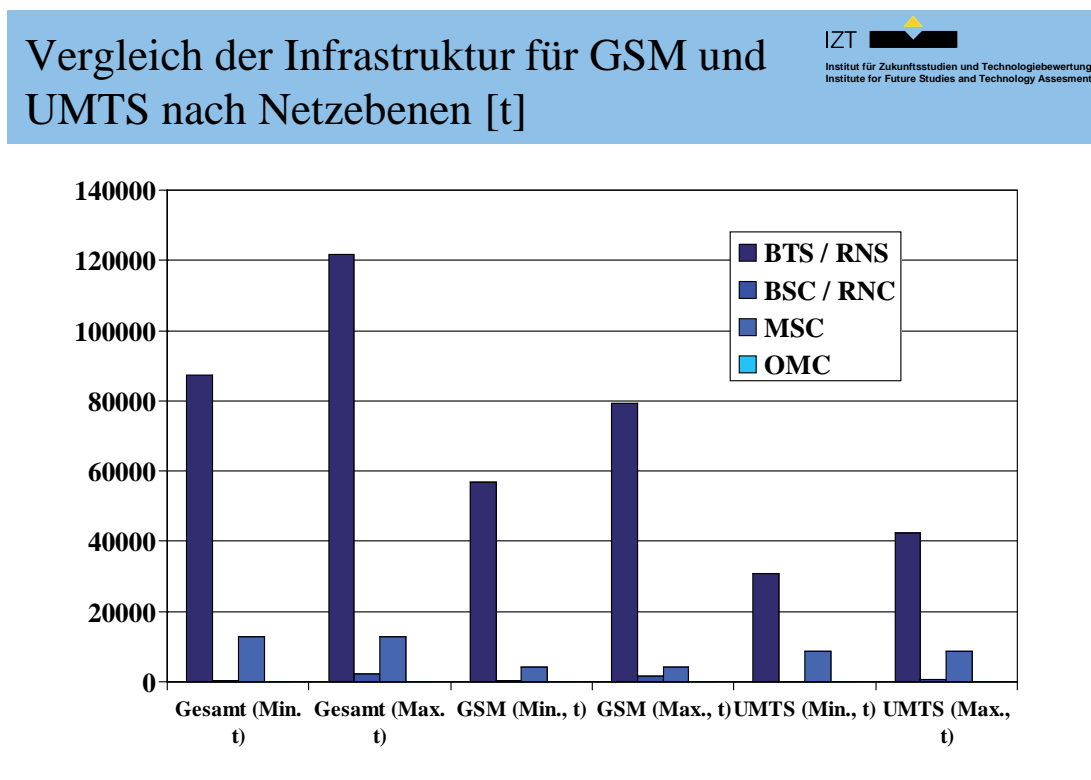
Element	NOC	Anzahl OMC	Gerätezahl	Anmerkung
RGU Radio Gateway Units	1	6+4	10	ca. 5 kg (geschätzt)
WS-GU Work Station Gateway Units	1	6+4	10	ca. 5 kg (geschätzt)
OMC-Server	1	6+4	10	ca. 35 kg mit Zubehör
SIP Session Initiation Protocol Server	1	6+4	10	ca. 35 kg mit Zubehör
Ethernet Switches	2	6+4	20	ca. 5 kg (geschätzt)
Dispatch PC's	1	6+4	10	ca. 30 kg (geschätzt)
ACP Administrative Control Panel	2	6+4	10	ca. 30 kg (geschätzt)
Firewall Server	1	6+4	10	ca. 35 kg (geschätzt)
Racks	3	6+4	10	ca. 200 kg (geschätzt)

Quelle: Eigene Schätzungen.

3.3 Abschätzung der gebundenen Massen

Auf Basis der Abschätzungen im Kap. 3 lassen sich eine Masse- und eine Mengenbilanz für die Infrastruktur des Mobilfunks erstellen. Hierbei wurde für die Basisstationen und die Basisstationen-Controller mit oberen und unteren Werten gerechnet. Die MSC wurden auf Basis eines Mobilfunkbetreibers geschätzt. Die Ausstattung des OMC wurde auf Basis der Angaben für Virginia berechnet.

Im Ergebnis zeigt sich, dass die in der Infrastruktur des Mobilfunksystems gebundenen Materialien in einem Rahmen von 100.000 bis 134.000 t liegen könnte, wobei die größten Massen in den Basisstationen liegen (zwischen 87.000 und 121.000 t) gefolgt mit weiten Abständen von der MSC (ca. 13.000 t). Die Controller-Stationen (BSC und RNC) mit 300 bis 2.300 t sowie die OMC mit etwa 40 t haben keine besondere Bedeutung.

Abbildung 11: Verteilung der Massen auf die einzelnen Ebenen des Mobilfunks.

Dr. Michael Scharp/MaRes

Quelle: Eigene Berechnung.

Die oben ermittelten Werte der Bestandteile wurden in verschiedene Gruppen zusammengefasst. Hierbei wurde Elektronik (die eigentliche Vermittlungstechnik mit BTS/RNS, BSC/RNC, Antennen sowie MSC), Elektrik (Stromversorgung, Kühlanlagen), Kabel, Batterien sowie Konstruktionsmaterialien gewählt. Die Zusammensetzung der Infrastruktur wurde wie folgt grob abgeschätzt:

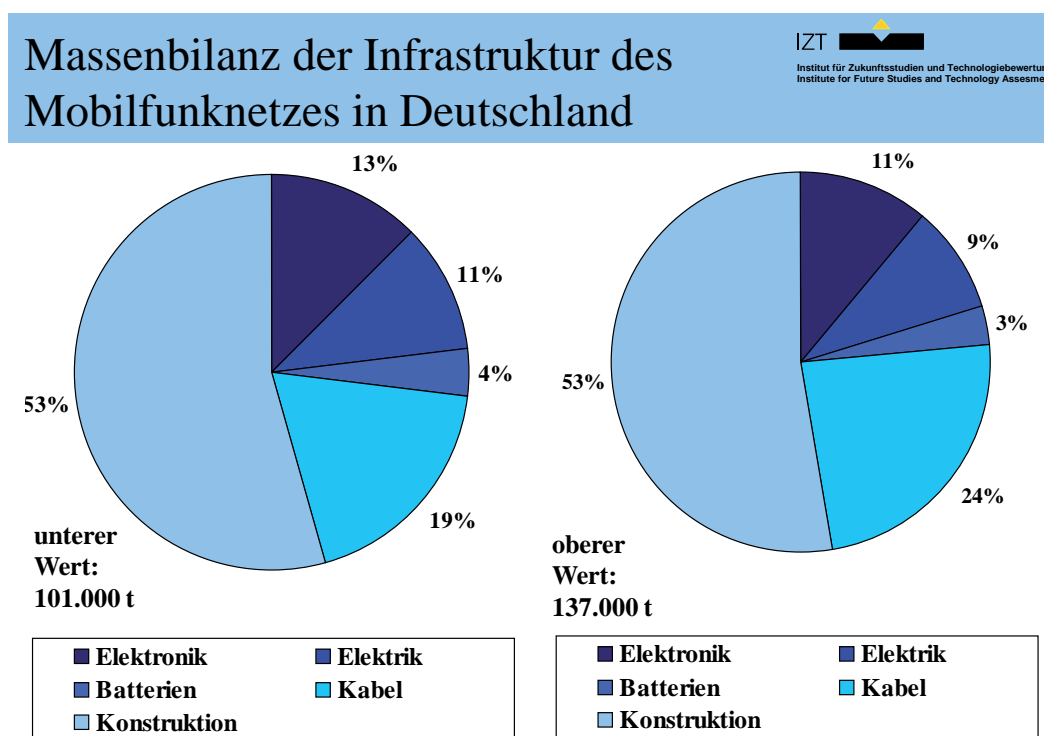
Tabelle 20: Massen unterschiedlicher Bestandteile eines Mobilfunksystems.

Gesamte Infrastruktur	Gesamt (t, unterer Wert)	Gesamt (t, oberer Wert)	GSM Min. [t]	GSM Max. [t]	UMTS Min. [t]	UMTS Max. [t]
Elektronik	12.700	14.800	6.900	8.100	5.800	6.700
Elektrik	10.600	12.400	6.400	7.500	4.200	4.900
Batterien	3.700	4.800	1.200	1.900	2.500	2.900
Kabel	18.800	32.600	11.800	20.800	7.000	11.800
Konstruktion	54.800	72.400	34.700	46.700	20.100	25.700
Summe	101.000	137.000	61.000	85.000	40.000	52.000

Quelle: Eigene Berechnung.

Bei der Abschätzung ist zu berücksichtigen, dass eine Vielzahl von Werten nur plausibel geschätzt werden konnte. Insbesondere für die Bestandteile Batterien und Kabel liegen nur unzureichende Informationen vor.

Abbildung 12: Prozentuale Zusammensetzung der Infrastruktur (GSM und UMTS).



Dr. Michael Scharp/MaRes

Quelle: Eigene Berechnung.

In den folgenden Tabellen sind die Mengenbilanz und die Massenbilanz aufgeführt.

Tabelle 21: Mengenbilanz des Mobilfunksystems (Stückzahlen und %).

Bestandteil	Anzahl / Kommentar	Faktor 1	Faktor 2	Faktor 3	Einheit	GSM Min.	GSM Max.	UMTS Min.	UMTS Max.
BTS / RNS	Anlagenanzahl				Anzahl	60.000	70.000	30.000	36.000
	Standorte				Anzahl	35.000	41.000	17.000	21.000
Racks-Technik	1/BTS und 1/RNS	1	1		Anzahl	60.000	70.000	30.000	36.000
Racks-Gehäuse	1/BTS und 1/RNS	1	1		Anzahl	60.000	70.000	30.000	36.000
Stromversorgung									
DC-Stromversorgung	1 pro Rack	1			Anzahl	60.000	70.000	30.000	36.000
Stromverteiler frei	30 % der Standorte	30 %			Anzahl	10.500	12.300	5.100	6.300
Stromverteiler Geb.	70 % der Standorte	70 %			Anzahl	24.500	28.700	11.900	14.700
Notstromversorgung	10 % bzw. 20 % BTS	10 %	20 %		Anzahl	3.500	8.200	1.700	4.200
Kühlung									
Innen	70 %, 1 pro BS	70 %			Anzahl	24.500	28.700	11.900	14.700
außen	30 %, 1 pro BS	30 %			Anzahl	10.500	12.300	5.100	6.300
Verkabelung	Strom-/Antennenkabel								
in Gebäude	70 % der BS	70 %	0,10	0,20	km	4.200	9.800	2.100	5.040
freistehend	30 % der BS	30 %	0,20	0,30	km	3.600	6.300	1.800	3.240
Richtfunk	10 % der BS	10 %	0,06	0,12	km	210	492	102	250
Stromanschluss freistehend	10 %, 500 m pro BS	6 %	0,50		km	1.050	1.230	510	630
Kabelschienen	20 % hoher Anteil	20 %			Anzahl	7.000	8.200	3.400	4.200
Kabelschienen	80 % geringer Anteil	80 %			Anzahl	28.000	32.800	13.600	16.800
Verteilerstation	6 % freistehenden BS	6 %			Anzahl	2.100	2.460	1.020	1.260
Container	8-Fuß Container	6 %			Anzahl	2.100	2.460	1.020	1.260
Antennen									
GSM/UMTS	3/BTS bzw. 3/RNS	3	3		Anzahl	180.000	210.000	90.000	108.000
RCU	30 % GSM 100 % UMTS	30 %	100 %		Anzahl	54.000	63.000	90.000	108.000
CCU	10 % GSM/100 % UMTS	10 %	100 %		Anzahl	3.500	4.100	17.000	21.000
Verstärker	pro Antenne	1			Anzahl	180.000	210.000	90.000	108.000
Elektroinstallation	pro BS	1			Anzahl	180.000	210.000	90.000	108.000
Befestigung	Befestigungsmaterial				Anzahl	180.000	210.000	90.000	108.000
Richtfunkantennen	10 % aller BTS/RNS	10 %			Anzahl	3.500	4.100	1.700	2.100
RCU	je Richtfunkantenne				Anzahl	3.500	4.100	1.700	2.100
Verstärker	je Richtfunkantenne				Anzahl	3.500	4.100	1.700	2.100
Elektroinstallation	je Richtfunkantenne				Anzahl	3.500	4.100	1.700	2.100
Befestigung	je Richtfunkantenne				Anzahl	3.500	4.100	1.700	2.100
Masten									
Masten Gebäude	70 % Ständerwerk	70 %			Anzahl	24.500	28.700	11.900	14.700
Masten frei/Anbau	10 % anBauwerke	10 %			Anzahl	3.500	4.100	1.700	2.100
Masten frei/Stahlrohr	15 % Stahlrohrmasten	15 %			Anzahl	5.250	10.500	4.500	5.400
Masten frei/Stahlgitter	5 % Stahl-Gittermasten	5 %			Anzahl	1.750	2.050	850	1.050
Blitzschutz									
Ableitung und Fang	20 % aller Standorte	20 %	0,05		km	350	410	170	210
Ableitung und Fang	80 % aller Standorte	80 %	0,02		km	560	656	272	336
Haltematerial	alle BS-Standorte	1			Anzahl	35.000	41.000	17.000	21.000
Verkabelung	alle BS-Standorte	0,01	0,02		km	350	820	170	420
Elektroinstallation	alle BS-Standorte	1			Anzahl	35.000	41.000	17.000	21.000
BSC/RNC	50-100 BTS/RNS	50	100		Anzahl	600	1.400	300	720
Racks-Technik	1-4 pro BSC/RNC	1	4		Anzahl	600	5.600	300	2.880
Racks-Gehäuse	1-4 pro BSC/RNC	1	4		Anzahl	600	5.600	300	2.880
Kühlanlagen	0-1 pro BSC/RNC	0	1		Anzahl	-	1.400	-	720
DC-Stromversorgung	1 pro Station/Rack	1	4		Anzahl	600	5.600	300	2.880
Notstromversorgung	1 pro BSC/RNC	0 %	10 %		Anzahl	-	140	-	72
Verkabelung	20m/BSC-40m/RNC	0,02	0,04		km	12	28	12	29
						GSM + UMTS min.		GSM + UMTS max.	
MSC					Anzahl	140		200	
Racks Gehäuse	Gehäuse Netztechnik	39	42		Anzahl	5.390	5.390	8.400	8.400
Kühlanlagen	6-8 Aggregate	6	8		Anzahl	840	840	1.600	1.600
Verkabelung	200-500 m pro Rack	0,10	0,20		km	539	539	1.680	1.680
USV	4-8 Aggregate	4	8		Anzahl	560	560	1.600	1.600
Notstromversorgung	60-150 Batterien	60	150		Anzahl	8.400	8.400	30.000	30.000
VLR	1 Rack je MSC	1	1		Anzahl	140	140	200	200
HLR, AuC, EIR	6 Racks MSC	6	6		Anzahl	840	840	1.200	1.200
GMSC	1,5-3 pro MSC	1,5	3		Anzahl	210	210	600	600
SGSN und GGSN	1,5-2 pro MSC	1,5	2		Anzahl	210	210	400	400
GGSN	1,5-3 pro MSC	1,5	3		Anzahl	210	210	600	600
weitere Systeme	NSR, TRAU, OSS, BAU, MG, GPS-Clock	27	27		Anzahl	3.780	3.780	5.400	5.400
OMC/NMS					Anzahl	10			
Gateways/Switches	je 1 RGU, WS-GU, 2 Ethernet-S.	4	10		Anzahl	40	40	40	40
Server	je 1 OMC, SIP, Firew.	3	10		Anzahl	30	30	30	30
ACP, Dispatch-PC	je 2 ACP, je 1 PC	3	10		Anzahl	30	30	30	30
Racks Gehäuse	je 3	3	10		Anzahl	30	30	30	30

Quelle: Eigene Abschätzungen. Zu den Faktoren siehe Kap. 3.2. Alle Angaben sind Stückangaben (Anzahl) es sei denn, die Einheit beträgt „km“ oder „%“.

Tabelle 22: Abschätzung der Massenbilanz des Mobilfunksystems.

Bestandteil		Faktor 1	Faktor 2	Faktor 3	Einheit	GSM Min. (t)	GSM Max. (t)	UMTS Min. (t)	UMTS Max. (t)
BTS / RNS	Anlagenanzahl				Anzahl	60.000	70.000	30.000	36.000
BTS / RNS	Standorte				Anzahl	35.000	41.000	17.000	21.000
Racks-Technik	1/BTS und 1/RNS	0,055	0,06	25 %	t	3.300	3.850	1.800	2.160
Racks-Gehäuse	1/BTS und 1/RNS	0,165	0,18	75 %	t	9.900	11.550	5.400	6.480
Stromversorgung									
DC-Stromversorgung	1 pro Rack	0,001	0,001		t	60	70	30	36
Stromverteiler frei	30 % der Standorte	0,100			t	1.050	1.230	510	630
Stromverteiler Geb.	70 % der Standorte	0,020			t	2.450	2.870	1.190	1.470
Notstromversorgung	10 % bzw. 20 % BTS	0,150			t	525	1.230	255	630
Kühlung									
Innen	70 %, 1 pro BS	0,025			t	613	718	298	368
außen	30 %, 1 pro BS	0,050			t	525	615	255	315
Verkabelung	Strom-/Antennkabel								
in Gebäude	70 % der BS	0,800	t/km		t	3.360	7.840	1.680	4.032
freistehend	30 % der BS	1,200	t/km		t	4.320	7.560	2.160	3.888
Richtfunk	10 % der BS	1,200	t/km		t	252	590	122	300
Stromanschluss freistehend	10 %, 500 m pro BS	3,000	t/km		t	3.150	3.690	1.530	1.890
Kabelschienen	20 % hoher Anteil	0,250			t	1.750	2.050	850	1.050
Kabelschienen	80 % geringer Anteil	0,050			t	1.400	1.640	680	840
Verteilerstation	6 % freistehenden BS	0,100			t	210	246	102	126
Container	8-Fuß Container	0,750			t	1.575	1.845	765	945
Antennen									
GSM/UMTS	3/BTS bzw. 3/RNS	0,006	0,012		t	1.080	1.260	1.080	1.296
RCU	30 % GSM 100 % UMTS	0,005			t	270	315	450	540
CCU	10 % GSM/100 % UMTS	0,004			t	14	16	68	84
Verstärker	pro Antenne	0,005			t	900	1.050	450	540
Elektroinstallation	pro BS	0,005			t	900	1.050	450	540
Befestigung	Befestigungsmaterial	0,010			t	1.800	2.100	900	1.080
Richtfunkantennen	10 % aller BTS/RNS	0,005			t	18	21	9	11
RCU	je Richtfunkantenne	0,005			t	18	21	9	11
Verstärker	je Richtfunkantenne	0,005			t	18	21	9	11
Elektroinstallation	je Richtfunkantenne	0,005			t	18	21	9	11
Befestigung	je Richtfunkantenne	0,010			t	35	41	17	21
Masten									
Masten Gebäude	70 % Ständerwerk	0,200			t	1.225	1.435	595	735
Masten frei/Anbau	10 % anBauwerke	0,050			t	175	205	85	105
Masten frei/Stahlrohr	15 % Stahlrohrmasten	0,700			t	3.675	7.350	3.150	3.780
Masten frei/Stahlgitter	5 % Stahl-Gittermasten	6,000			t	10.500	12.300	5.100	6.300
Blitzschutz									
Ableitung und Fang	20 % aller Standorte	0,25	1,25	g/cbm	t	88	513	43	263
Ableitung und Fang	80 % aller Standorte	0,25	1,25	g/cbm	t	140	820	68	420
Haltematerial	alle BS-Standorte	0,03	0,06		t	1.050	2.460	510	1.260
Verkabelung	alle BS-Standorte	0,800	t/km		t	280	656	136	336
Elektroinstallation	alle BS-Standorte	0,001			t	35	41	17	21
BSC/RNC	50-100 BTS/RNS								
Racks-Technik	1-4 pro BSC/RNC	0,068	0,06	25 %	t	41	378	17	166
Racks-Gehäuse	1-4 pro BSC/RNC	0,203	0,17	75 %	t	122	1.134	52	497
Kühlanlagen	0-1 pro BSC/RNC	0,025			t	-	35	-	18
DC-Stromversorgung	1 pro Station/Rack	0,003			t	2	17	1	9
Notstromversorgung	1 pro BSC/RNC	0,150			t	-	21	-	11
Verkabelung	20m/BSC-40m/RNC	1,200	t/km		t	14	34	14	35
						GSM+UMTS min.	GSM+UMTS max.		
MSC									
Racks Gehäuse	Gehäuse Netztechnik	75,00 %	Bezug: Netztechnik in t			1.222	1.222	1.905	1.905
Kühlanlagen	6-8 Aggregate	0,300			t	252,0	252,0	480,0	480,0
Verkabelung	200-500 m pro Rack	0,800	t/km		t	431,2	431,2	1.344,0	1.344,0
USV	4-8 Aggregate	0,550			t	308,0	308,0	880,0	880,0
Notstromversorgung	60-150 Batterien	0,075			t	630,0	630,0	2.250,0	2.250,0
VLR	1 Rack je MSC	0,300	75,00 %		t	31,5	31,5	45,0	45,0
HLR, AuC, EIR	6 Racks MSC	0,300	75,00 %		t	189,0	189,0	270,0	270,0
GMSC	1,5-3 pro MSC	0,290	75,00 %		t	45,7	45,7	130,5	130,5
SGSN und GGSN	1,5-2 pro MSC	0,380	75,00 %		t	59,9	59,9	114,0	114,0
GGSN	1,5-3 pro MSC	0,290	75,00 %		t	45,7	45,7	130,5	130,5
weitere Systeme	NSR, TRAU, OSS, BAU, MG, GPS-Clock	0,300	75,00 %		t	850,5	850,5	1.215,0	1.215,0
OMC/NMS									
Gateways/Switches	je 1 RGU, WS-GU, 2 Ethernet-S.	0,005			t	0,2	0,2	0,2	0,2
Server	je 1 OMC, SIP, Firew.	0,350			t	10,5	10,5	10,5	10,5
ACP, Dispatch-PC	je 2 ACP, je 1 PC	0,030			t	0,9	0,9	0,9	0,9
Racks Gehäuse	je 3	0,200			t	6,0	6,0	6,0	6,0
Summe	gerundet in Tonnen					61.000	85.000	40.000	52.000

Quelle: Eigene Abschätzungen. Zu den Faktoren siehe Kap. 3.2. Alle Werte sind in Tonnen (t) ausgewiesen es sei denn, es handelt sich um Verteilungsangaben („%“), Gewichte pro Kilometer (Kabel, t/km) oder Dichteangaben (g/cbm). Hierbei findet sich bei den Faktoren die jeweilige Einheit. Unabhängig davon werden alle Werte für GSM bzw. UMTS in der Gesamtbilanz in t angegeben.

3.4 Ressourcenbilanz für ausgewählte Bauteilgruppen und Stoffe

Aufgrund des Vorliegens von einigen Untersuchungen zur stofflichen Zusammensetzung von Bestandteilen des Mobilfunknetzes lassen sich auch sehr grobe Schätzungen über die Mengen einiger Stoffe machen. Die Aussagekraft ist jedoch nur beschränkt, da zum einen die Stückzahlen sehr unsicher sind und zum anderen nur wenige Komponenten des Mobilfunksystems hinsichtlich ihrer stofflichen Zusammensetzung untersucht wurden. Diese sind:

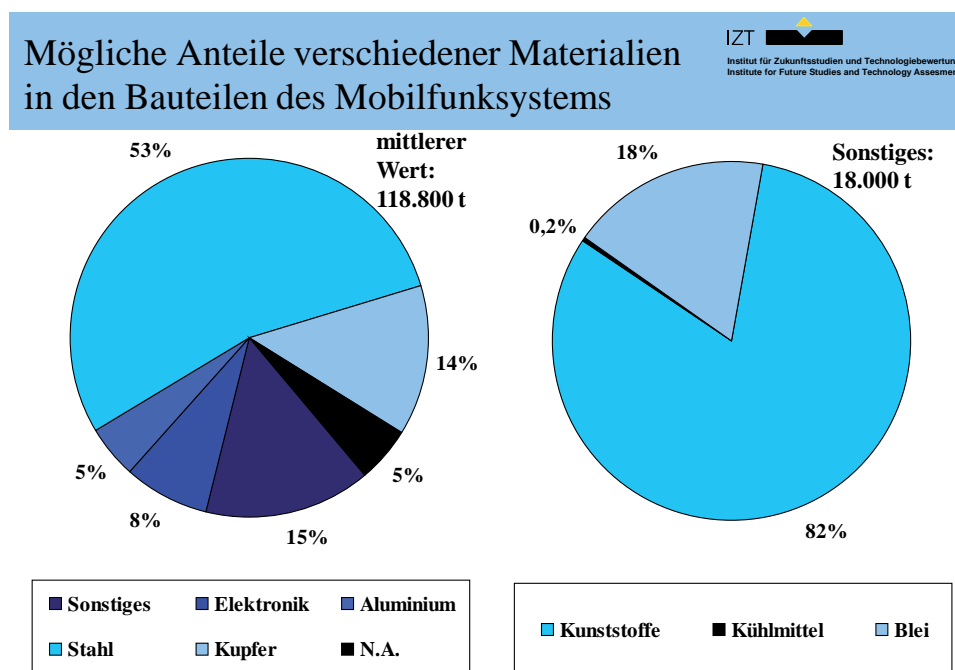
- Die Zusammensetzung von GSM und UMTS-Basisstationen (Emmenegger 2003:64-68);
- die Zusammensetzung von Kühleinrichtungen für Basisstationen (Emmenegger 2003:69ff.);
- die Zusammensetzung von Basisstationen-Controllern (Scharnhorst 2006:161);
- die Zusammensetzung eines SGSN/GSGN-Racks (Scharnhorst 2006:167).

Darüber hinaus lassen sich für einige Bauteile plausible Annahmen treffen (Antennen, Kabel, Befestigungen, Masten und Blitzschutzanlagen). In der Tabelle 23 sind die prozentualen Abschätzungen für Kupfer, Stahl, Aluminium, Elektronik und sonstiges (Kunststoffe, Kühlmittel und Bleibatterien) aufgeführt. Für die Abschätzung wurde zunächst der mittlere Wert von der Massenbilanz der GSM und UMTS-Systeme genommen (mittleres Gewicht, ca. 118.000 t). In der Tabelle 24 wurden diese Schätzungen dann auf die zuvor ermittelten mittleren Massen der Bestandteile des Mobilfunksystems angewendet.

Fasst man die Ergebnisse zusammen, so sollte der weitaus größte Anteil von schätzungsweise 53 % bzw. ca. 64.000 t durch Stahl abgedeckt werden. Dies ergibt sich vor allem aus den Mastkonstruktionen, Installationsmaterialien und den Rack-Gehäusen. An zweiter Stelle dürften Kupfer mit ca. 16.000 t bzw. 14 % stehen. Die Elektronik steht mit ca. 9.000 t bzw. 8 % an dritter Stelle, wobei jedoch die Elektronik nicht weiter aufgeschlüsselt werden konnte.⁷⁶ Unter Sonstiges mit schätzungsweise 18.000 t bzw. 15 % wurden Blei (Notstromversorgung, Schätzung 3.000 t), Kunststoffe in Kabeln (Schätzung: 14.000 t) sowie Kühlmittel (Schätzung: 40 t) subsummiert. Diese Werte sind grob geschätzt, geben aber zumindest Hinweise über einige Materialien trotz der großen Unsicherheiten bei der Bestimmung der Werte. Die Werte für die Kunststoffe dürften noch deutlich höher liegen, da die Kunststoffe in der Elektronik oder als baukonstruktive Anteile nicht berücksichtigt wurden. In den folgenden Abbildungen sind die Tabellen graphisch zusammengefasst:

⁷⁶ Auf allen Netzebenen (Basisstationen, Controller-Stationen, MSC und OMC werden eine Vielzahl von Datenverarbeitungssystemen eingesetzt. Nur für wenige – und zudem nach wenigen Jahren schon veraltete Geräte – liegen Informationen über die materielle Zusammensetzung vor (vgl. z.B. Emmenegger et al. 2003 und Scharnhorst 2006). Eine Hochrechnung auf einzelne Stoffe auf Basis der Analyse weniger Geräte – und damit eine Übertragung auf zahlreiche andere Gerätetypen – könnte bestenfalls Größenordnungen ergeben ohne jedoch auch annähernd begründbar zu sein. Auch andere Studien über die Zusammensetzung von PC's sind wenig hilfreich, da deren Elektronik kaum vergleichbar ist. Beispielsweise haben diese PC's zumeist nur eine Festplatte und wenige Prozessoren, die Datenbanksysteme des Mobilfunks (AuC, EIR u.a.) haben eine Vielzahl von Festplatten und Prozessoren. Ebenso ist ein Vergleich der MSC mit Rechenzentren nur sehr eingeschränkt möglich, da z.B. keine Informationen vorliegen, ob beispielsweise die Schnittstellensysteme GSGS oder SGSN oder die Trau vergleichbar mit einem Datenserver sind. Aufgrund dessen muss auf eine detaillierte Aufschlüsselung der Elektronik verzichtet werden.

Abbildung 13: Mögliche Anteile verschiedener Materialien im Mobilfunksystems.



Dr. Michael Scharp/MaRes

Quelle: Eigene Darstellung.

Tabelle 23: Schätzungen der prozentualen Zusammensetzung der Bauteile des Mobilfunksystems [Mittleres Gewicht in t und Zusammensetzung in %].

Bauteile	Mittleres Gewicht	N.A.	Kupfer	Stahl	Aluminium	Elektronik	Sonstiges	Begründung
BTS / RNS	T	%	%	%	%	%	%	
Racks-Technik	5.555		10 %		5 %	85 %		Der Cu-Anteil kann auf 10 % geschätzt werden. Die Einschübe haben einen konstruktiven Al-Anteil.
Racks-Gehäuse	16.665			90 %	10 %			Nach Emmenegger (2003:64-68) entfallen ca 75 % der Masse auf das Gehäuse aus Al und Stahl, wobei das Stahlblech überwiegt. Die Einschübe haben einen konstruktiven Al-Anteil.
Stromversorgung								
DC-Stromversorgung	98	25 %	10 %	20 %	20 %	25 %		geschätzte Anteile aufgrund mangelnder Daten
Stromverteiler frei	1.710	35 %	20 %	30 %	10 %	5 %		hierzu sind keine Daten vorhanden. Aufgrund der Funktion werden die Werte geschätzt
Stromverteiler Geb.	3.990	35 %	20 %	30 %	10 %	5 %		hierzu sind keine Daten vorhanden. Aufgrund der Funktion werden diese Werte geschätzt
Notstromversorgung	1.320	20 %		5 %			75 %	Als Notstromversorgung werden Bleigel-Batterien mit Stahlmantel verwendet. Der Bleianteil wird auf 75 % geschätzt. Der Rest sind Kunststoffe und Schwefelsäure.
Kühlung								
Innen	998	32 %	10 %	40 %	9 %	5 %	4 %	Nach Emmenegger (2006:69) enthält die Kühlanlage 8,5 % Cu, 39 % Stahlblech, 9 % Al, 4 % Kühlmittel sowie 2,5 kg Ventilatormotor Cu und Stahl)
außen	855	7 %	17 %	64 %	5 %	5 %	2 %	Nach Emmenegger (2006:69) enthält die Kühlanlage 17 % Cu, 64 % Stahl und -blech, 4,5 % Al, 2 % Kühlmittel
Verkabelung								
in Gebäude	8.456		50 %				50 %	Schätzung: 50 % Cu - 50 % Kunststoff
freistehend	8.964		50 %				50 %	Schätzung: 50 % Cu - 50 % Kunststoff
Richtfunk	632		50 %				50 %	Schätzung: 50 % Cu - 50 % Kunststoff
Stromanschluss freistehend	5.130		50 %				50 %	Schätzung: 50 % Cu - 50 % Kunststoff
Kabelschienen	2.850			100 %				Kabelschienen bestehen aus verzinktem Stahlblech
Kabelschienen	2.280			100 %				Kabelschienen bestehen aus verzinktem Stahlblech
Verteilerstation	342	45 %	10 %	10 %	10 %	5 %	20 %	geschätzt Werte aufgrund mangelnder Daten
Container	2.565	20 %		80 %				Container bestehen v.a. aus Stahlblech, allerdings werden auch noch andere Materialien verbaut
Antennen								Antennen bestehen v.a. aus Kunststoffen mit geringem Anteil an Cu oder Al. Geschätzte Werte.
GSM/UMTS	2.358	10 %	10 %		10 %	5 %	65 %	geschätzt Werte aufgrund mangelnder Daten
RCU	788	35 %	10 %	30 %	20 %	5 %		geschätzt Werte aufgrund mangelnder Daten
CCU	91	30 %	10 %	25 %	10 %	25 %		geschätzt Werte aufgrund mangelnder Daten
Verstärker	1.470	30 %	10 %	25 %	10 %	25 %		geschätzt Werte aufgrund mangelnder Daten
Elektroinstallation	1.470	35 %	20 %	30 %	10 %	5 %		geschätzt Werte aufgrund mangelnder Daten
Befestigung	2.940			100 %				Materialien sind v.a. Stahlbleche oder Stahl
Richtfunkantennen	29	10 %	10 %		10 %	5 %	65 %	geschätzt Werte aufgrund mangelnder Daten
RCU	29	15 %	20 %	20 %	20 %	25 %		geschätzt Werte aufgrund mangelnder Daten
Verstärker	29	35 %	20 %	20 %	20 %	5 %		geschätzt Werte aufgrund mangelnder Daten
Elektroinstallation	29	35 %	20 %	30 %	10 %	5 %		geschätzt Werte aufgrund mangelnder Daten
Befestigung	57			100 %				Materialien sind v.a. Stahlbleche oder Stahl
Masten								
Masten Gebäude	1.995			100 %				Materialien sind v.a. verzinkter Stahl
Masten frei/Anbau	285			100 %				Materialien sind v.a. verzinkter Stahl
Masten frei/Stahlrohr	8.978			100 %				Materialien sind v.a. verzinkter Stahl
Masten frei/Stahlgitter	17.100			100 %				Materialien sind v.a. verzinkter Stahl
Blitzschutz								
Ableitung und Fang	453		20 %	40 %	40 %			Materialien sind Cu, Al oder Stahl; geschätzte Werte
Ableitung und Fang	724		20 %	40 %	40 %			Materialien sind Cu, Al oder Stahl; geschätzte Werte
Haltematerial	2.640			50 %	50 %			Materialien sind Al oder Stahl, geschätzte Werte
Verkabelung	704		50 %				50 %	geschätzt Werte aufgrund mangelnder Daten
Elektroinstallation	57	25 %	20 %	30 %	10 %	5 %	10 %	geschätzt Werte aufgrund mangelnder Daten

Bauteile	Mittleres Gewicht	N.A.	Kupfer	Stahl	Aluminium	Elektronik	Sonstiges	Begründung
BSC/RNC								
Racks-Technik	301		10 %			90 %		Schätzung entsprechend Emmenegger 2006:64-68
Racks-Gehäuse	902			90 %	10 %			Schätzung entsprechend Emmenegger 2006:64-68
Kühlanlagen	27	25 %	10 %	40 %	10 %	5 %	10 %	Schätzung entsprechend Emmenegger 2006:64-68
DC-Stromversorgung	14	25 %	10 %	20 %	20 %	25 %		geschätzt Werte aufgrund mangelnder Daten
Notstromversorgung	16	20 %		5 %			75 %	s.o. Notstromversorgung
Verkabelung	48		50 %				50 %	der Kupferanteil wird auf 50 % geschätzt
MSC								
Racks Gehäuse	3.127			90 %	10 %			Schätzung entsprechend Emmenegger 2006:64-68
Kühlanlagen	732	30 %	10 %	40 %	10 %	5 %	5 %	Schätzung entsprechend Emmenegger 2006:64-68
Verkabelung	1.775		50 %				50 %	der Kupferanteil wird auf 50 % geschätzt
USV	1.188	10 %	20 %	30 %	10 %	30 %		geschätzt Werte aufgrund mangelnder Daten
Notstromversorgung	2.880	20 %		5 %			75 %	s.o. Notstromversorgung
VLR	77		10 %		5 %	85 %		Werte analog der GGSN nach Emmenegger 2006:167
HLR, AuC, EiR	459		10 %		5 %	85 %		Werte analog der GGSN nach Emmenegger 2006:167
GMSC	176		10 %		5 %	85 %		Werte analog der GGSN nach Emmenegger 2006:167
SGSN und GGSN	174		10 %		5 %	85 %		Werte analog der GGSN nach Emmenegger 2006:167
GGSN	176		10 %		5 %	85 %		Werte analog der GGSN nach Emmenegger 2006:167
weitere Systeme	2.066		10 %		5 %	85 %		Werte analog der GGSN nach Emmenegger 2006:167
OMC/NMS								
Gateways/Switches	0	10 %	5 %	40 %	15 %	30 %		Werte analog der GGSN nach Emmenegger 2006:167
Server	21	10 %	5 %	40 %	15 %	30 %		Werte analog der GGSN nach Emmenegger 2006:167
ACP, Dispatch-PC	2	10 %	5 %	40 %	15 %	30 %		Werte analog der GGSN nach Emmenegger 2006:167
Racks Gehäuse	12			90 %	10 %			Schätzung entsprechend Emmenegger 2006:64-68

Quelle und Anmerkungen: Eigene Abschätzungen. Der Anteil der Elektronik wurde generell geschätzt. N.A. = nicht näher zu bestimmende Anteile über die keine Aussage getroffen werden kann. N.A. ergibt sich wie folgt: 100 % - Kupfer – Stahl – Aluminium – Elektronik – Sonstiges.

Auf Basis der Schätzungen in Tabelle 23 werden in der nachfolgenden Tabelle die Größenordnungen für die Materialien abgeschätzt.

Tabelle 24: Mögliche Anteile verschiedener Materialien in den Bauteilen des Mobilfunksystems.

Bauteile	Mittleres Gewicht	N.A.	Kupfer	Stahl	Aluminium	Elektronik	Sonstiges	Rundung
	t	t	t	t	t	t	t	
BTS / RNS								
Racks-Technik	5.555	-	600	-	300	4.700	-	zwei Stellen abgerundet
Racks-Gehäuse	16.665	-	-	15.000	1.700	-	-	zwei Stellen abgerundet
Stromversorgung								
DC-Stromversorgung	98	20	10	20	20	20	-	eine Stelle abgerundet
Stromverteiler frei	1.710	600	300	500	200	100	-	zwei Stellen abgerundet
Stromverteiler Geb.	3.990	1.400	800	1.200	400	200	-	zwei Stellen abgerundet
Notstromversorgung	1.320	300	-	100	-	-	1.000	zwei Stellen abgerundet
Kühlung								
Innen	998	320	100	400	90	50	40	eine Stelle abgerundet
außen	855	60	150	550	40	40	20	eine Stelle abgerundet
Verkabelung								
in Gebäude	8.456	-	4.200	-	-	-	4.200	zwei Stellen abgerundet
freistehend	8.964	-	4.500	-	-	-	4.500	zwei Stellen abgerundet
Richtfunk	632	-	300	-	-	-	300	zwei Stellen abgerundet
Stromanschluss freistehend	5.130	-	2.600	-	-	-	2.600	zwei Stellen abgerundet
Kabelschienen	2.850	-	-	2.900	-	-	-	zwei Stellen abgerundet
Kabelschienen	2.280	-	-	2.300	-	-	-	zwei Stellen abgerundet
Verteilerstation	342	150	30	30	30	20	70	eine Stelle abgerundet
Container	2.565	500	-	2.100	-	-	-	
Antennen								
GSM/UMTS	2.358	240	240	-	240	120	1.530	zwei Stellen abgerundet
RCU	788	280	80	240	160	40	-	eine Stelle abgerundet
CCU	91	30	10	20	10	20	-	eine Stelle abgerundet
Verstärker	1.470	400	100	400	100	400	-	zwei Stellen abgerundet
Elektroinstallation	1.470	510	290	440	150	70	-	eine Stelle abgerundet
Befestigung	2.940	-	-	2.900	-	-	-	zwei Stellen abgerundet
Richtfunkantennen	29	5	5	-	-	-	20	eine Stelle abgerundet
RCU	29	5	5	5	5	5	5	eine Stelle abgerundet
Verstärker	29	15	5	5	5	-	-	eine Stelle abgerundet
Elektroinstallation	29	10	10	10	-	-	-	eine Stelle abgerundet
Befestigung	57	-	-	60	-	-	-	eine Stelle abgerundet
Masten								
Masten Gebäude	1.995	-	-	2.000	-	-	-	zwei Stellen abgerundet
Masten frei/Anbau	285	-	-	290	-	-	-	eine Stelle abgerundet
Masten frei/Stahlrohr	8.978	-	-	9.000	-	-	-	zwei Stellen abgerundet
Masten frei/Stahlgitter	17.100	-	-	17.100	-	-	-	zwei Stellen abgerundet
Blitzschutz								
Ableitung und Fang	453	-	90	180	180	-	-	eine Stelle abgerundet
Ableitung und Fang	724	-	100	300	300	-	-	zwei Stellen abgerundet
Haltematerial	2.640	-	-	1.300	1.300	-	-	zwei Stellen abgerundet
Verkabelung	704	-	350	-	-	-	350	eine Stelle abgerundet
Elektroinstallation	57	10	10	20	10	-	10	eine Stelle abgerundet
BSC/RNC								
Racks-Technik	301	-	30	-	-	270	-	eine Stelle abgerundet
Racks-Gehäuse	902	-	-	810	90	-	-	eine Stelle abgerundet
Kühlanlagen	27	5	5	10	5	5	-	eine Stelle abgerundet
DC-Stromversorgung	14	4	1	3	3	4	-	nicht gerundet
Notstromversorgung	16	3	-	1	-	-	12	nicht gerundet
Verkabelung	48	-	25	-	-	-	25	eine Stelle abgerundet
MSC								
Racks Gehäuse	3.127	-	-	2.800	300	-	-	zwei Stellen abgerundet
Kühlanlagen	732	220	70	290	70	40	40	eine Stelle abgerundet
Verkabelung	1.775	-	900	-	-	-	900	zwei Stellen abgerundet
USV	1.188	120	240	360	120	360	-	eine Stelle abgerundet
Notstromversorgung	2.880	600	-	100	-	-	2.200	zwei Stellen abgerundet
VLR	77	-	8	-	4	65	-	nicht gerundet
HLR, AuC, EiR	459	-	46	-	23	390	-	nicht gerundet
GMSC	176	-	18	-	9	150	-	nicht gerundet
SGSN und GGSN	174	-	17	-	9	148	-	nicht gerundet
GGSN	176	-	18	-	9	150	-	nicht gerundet
weitere Systeme	2.066	-	200	-	100	1.800	-	zwei Stellen abgerundet
OMC/NMS								
Gateways/Switches	0,4	-	-	-	-	-	-	Vernachlässigt
Server	21,0	2	1	8	3	6	-	nicht gerundet
ACP, Dispatch-PC	1,8	-	-	1	-	1	-	-
Racks Gehäuse	12,0	-	-	10	-	-	-	eine Stelle abgerundet
Summen	118.805	5.800	16.500	63.800	6.000	9.200	17.800	
Anteile		5%	14%	54%	5%	8%	15%	

Quelle und Anmerkungen: Elektronik eigene Abschätzungen. N.A. = nicht näher zu bestimmende Anteile über die keine Aussage getroffen werden kann. N.A. ergibt sich wie folgt: 100 % - Kupfer – Stahl – Aluminium – Elektronik – Sonstiges. Aufgrund der Rundung kann es zu geringen Abweichungen kommen.

3.5 Ergebnisübersicht zur Ressourcenbilanz

Die obigen Schätzungen umfassen nur die primäre Infrastruktur von Basisstationen, Controller-Stationen und Vermittlungsstationen. Nicht erfasst sind die sekundäre Infrastruktur (NMC mit Kundenbetreuung) sowie die Räumlichkeiten, die zur Bedienung des Geschäftsfeldes notwendig sind wie auch Flächen und Räumlichkeiten zur Aufstellung der Infrastruktur. Bei der Abschätzung sind zudem folgende Unsicherheiten zu berücksichtigen:

- Eine stetige Weiterentwicklung der Netzwerktechnik auf allen Ebenen führt dazu, dass die Geräte immer kleiner und kompakter werden sowie mehr und mehr Funktionen integrieren. Ein Beispiel hierfür sind BTS, die sowohl GSM als auch UMTS gleichzeitig empfangen können. Dies bedeutet, dass mit weniger Material die gleichen Funktionen übernommen werden können.
- Die Anzahl der Basisstationen ist nur ungefähr zu ermitteln. Es ist auch unsicher, ob alle Basisstationen tatsächlich mit der oben angenommenen Ausstattung ausgerüstet sind. Ebenso ist unsicher, ob die Literaturwerte der Basisstationen auch Mikro- und Pico-Basisstationen umfassen, die mit deutlich geringeren Materialaufwendungen verbunden sind.
- In 2009 hat die Bundesnetzagentur die Zahl der UMTS-Basisstationen mit 39.000 angegeben, also 3.000 mehr als in den obigen Szenarien angenommen. Dieser höhere Wert wurde nicht berücksichtigt, da gleichzeitig keine Aussage zur Anzahl der GSM-Stationen gemacht wurde. Hierbei ist zum einen zu berücksichtigen, dass UMTS und GSM wenn möglich an einem Standort zusammengefasst werden, d.h. die zusätzlichen Stationen könnten in vorhandene GSM-Stationen integriert sein. Zum anderen verwenden die Netzbetreiber inzwischen duale Systeme, die sowohl UMTS als auch GSM übertragen können. Bei diesem dualen Ausbau werden die GSM-Stationen im Prinzip aufgelöst. Da die BNA hierzu aber keine Aussage macht, wird der neuere Wert der BNA für die UMTS-Stationen nicht verwendet. Hierdurch könnte sich ein zusätzlicher „Massenfehler“ von weniger als 3 % ergeben.
- Ebenso sind die Anzahl der BSC und RNC sowie die der MSC mit hohen Unsicherheiten verbunden und nicht mehr als plausible Schätzungen.
- Die Ausstattung der Basisstationen mit Batterien ist gleichfalls unsicher.⁷⁷ Ein Hersteller von Notstromversorgungen liefert diese für die Mobilfunkbetreiber vor allem mit Batterien, ein Mobilfunkbetreiber hingegen baut die Batterie-Notstromversorgung kontinuierlich ab.
- Weiterhin ist unbekannt, in welchem Umfang große Mast- und Turmanlagen verwendet werden. Derartige Konstruktionen können leicht Gewichte von 20 bis 200 (und mehr) Tonnen haben. Würden beispielsweise 100 Türme mit 100 Tonnen Stahl einberechnet, so würde die Gesamtmasse der Infrastruktur auf ca. 110.000 (Minimalwert) bzw. 150.000 (Maximalwert) anwachsen. Der Stahlanteil könnte sich dann in der abgeschätzten Ressourcenbilanz (vgl. Kap. 3.4) deutlich erhöhen (von ca. 64.000 t auf ca. 74.000 t).
- Nicht berücksichtigt wurden auch Baukonstruktionen bei der Infrastruktur. Dies umfasst die Errichtung und Nutzung von Gebäuden ebenso wie bauliche Maßnahmen bei freistehenden Basisstationen oder Masten (Fundamente, Zäune, Wegzuführungen). Auch diese Maßnahmen können die Ressourcenbilanz deutlich verändern. Würden beispielsweise 10 % der Basisstationen (9.000) vollkommen frei stehen und ein Fundament von ca. 10 Tonnen für Masten und Container benötigen, so würden sich zusätzliche Massen von 90.000 Zement und Stahl ergeben. Dies wäre in der gleichen Größenordnung wie die berechnete Infrastruktur von minimal 100.000 t.
- Nicht berücksichtigt wurde auch die sekundäre Infrastruktur mit den Verkaufsstellen. Würde man nur 10.000 Verkaufsstellen – eine sehr vorsichtige Schätzung – für den Vertrieb der Dienstleistung mit einberechnen und jede Verkaufsstelle mit einem Massenanteil von 10 t ansetzen⁷⁸, so würde dies allein mit 100.000 t bilanziert werden müssen.

Zusammenfassend kann jedoch festgestellt werden, dass die Primärinfrastruktur mit 100.000 bis 140.000 t für die Mobilfunknetze im Vergleich zu anderen Infrastrukturen wie Gas, Wasser oder Elektrizität nicht besonders hoch ist. Bei diesen Infrastrukturen liegen die verbauten Massen im dreistelligen Millionen-Tonnen-Bereich.

⁷⁷ In den Szenarien wurde zugrundegelegt, dass zwischen 10 und 20% aller BTS bzw. RNS mit Batteriesätzen von 150 kg ausgestattet sind. Demzufolge könnte es zwischen 9.000 (untere Werte mit 10 %) und 21.200 (obere Werte mit 20 %) Batteriesätze geben in den Basisstationen.

⁷⁸ Ein Einfamilienhaus wiegt zwischen 100 und 200 t.

4 Abschätzung der Ressourcenflüsse im Mobilfunksystem

4.1 Einleitung und systemische Problemlagen

Mobilfunk induziert wie jede andere Technik oder Dienstleistung Materialflüsse, da technische Geräte nur eine endliche Lebensdauer haben. Darüber hinaus gibt es jedoch vier spezifische Entwicklungen, durch die der Mobilfunksektor quasi „getrieben“ wird:

- Zum einen ist der Mobilfunksektor in einem stetigen Prozess der technischen Weiterentwicklung und der Einführung neuer Technologien unterworfen, da er wie kaum ein anderer Sektor von der Computertechnik abhängig ist.⁷⁹ Dieser Prozess wirkt sich vor allem auf die Computerhardware der Mobilfunkinfrastruktur aus bei den Basisstationen, den Controller-Stationen und den Mobile Switching Centern, da hier die zentrale Computertechnik eingesetzt wird.
- Zum anderen führt die Weiterentwicklung der Systemtechnik (GSM, UMTS sowie nachfolgende Systeme 3G und 3,5G, vgl. Griesse et al. 2004:23ff.) zu einem kontinuierlichen Prozess des Auf- und Ausbaus, bei dem mehrere Systeme gleichzeitig mit unterschiedlichen Ausbaustandards „online“ sind.
- Weiterhin gibt es einen deutlichen Trend der Miniaturisierung und der Vereinheitlichung von Computertechnologien. Moderne BSC-Systeme können sowohl GSM als auch UMTS gleichzeitig vermitteln oder die Antennen können beide Signale verarbeiten, so dass doppelte Schrank-, Kühlungs- und Stromversorgungssysteme überflüssig werden. Gleichzeitig werden die elektronischen Bestandteile der Anlagen immer kleiner und benötigen somit absolut gesehen weniger Ressourcen.
- Letztendlich führt der Bedarf nach immer höheren Übertragungsleistungen dazu, dass die Basisstationen, wie am Beispiel des UMTS-Systems zu sehen ist, immer dichter an den Endkunden heranrücken. In der Konsequenz bedeutet dies, dass eine deutlich höhere Anlagenanzahl – bis hin zu Mikrosystemen, die beispielsweise nur einen Marktplatz abdecken können – benötigt wird, um eine hinreichende Netzabdeckung zu erreichen. Dieser Prozess führt trotz der Miniaturisierung vermutlich dazu, dass die Mobilfunkinfrastruktur höhere Ressourcenströme induziert.

Diese beiden Prozesse machen es äußerst schwer, die durch den Mobilfunksektor induzierten Ressourcenströme abzuschätzen. Um zumindest näherungsweise Schätzungen geben zu können, wurde eine umfangreiche Dokumenten- und Webrecherche unternommen sowie zahlreiche telefonische Interviews geführt. Die Darstellung der Materialflüsse lehnt sich an der Beschreibung der Infrastruktur des Mobilfunksektors an. Dies ist aufgeteilt in das Base Subsystem BTS mit den Antennen und den Basisstationen⁸⁰ und dem Basisstationen-Controller (BSC, GSM) bzw. Radio Network Controller (RNC, UMTS), die das BTS/RNS-System steuern. Das Mobiltelefon sendet seine Signale an die Antennen der Basisstationen. Diese leiten das Gespräch weiter an die Basisstationen-Controller. Basisstationen und Basisstationen-Controller bzw. RNC sind einander sehr ähnlich, so dass sie zusammen behandelt werden. Sie bestehen aus den folgenden Elementen:

- Racks: In den Racks bzw. Gehäuseschränken wird der größte Teil der Vermittlungstechnik untergebracht sowie einige Bestandteile, die nachfolgend beschrieben werden.
- Vermittlungstechnik: Zur Vermittlungstechnik gehören Verstärker und Transceiver, Antennenfilter und -verbinder sowie andere Elemente. Die gesamte Elektronik ist in den zuvor genannten Racks eingebaut.
- Stromversorgung: Die DC-Stromversorgung ist gleichfalls zumeist in den Racks integriert. Es handelt sich zumeist um Einschübe.
- Notstromversorgung: Notstromversorgungen werden inzwischen nur noch für besonders wichtige Basisstationen verwendet. Sie besteht vor allem aus einem Satz von Bleigel-Batterien. Auch sie können in die Racks integriert sein, wobei jedoch ein Batteriesatz für die gesamte Anlage ausreichend ist.
- Kühlung: Die Vermittlungstechnik wird vor allem auf der Ebene der Controllerstationen gekühlt. Inzwischen gibt es zwar Systeme mit passiver anstelle elektrischer Kühlung, diese sind jedoch noch nicht sehr verbreitet und werden deshalb nicht betrachtet.

⁷⁹ Ressourcenströme, die durch „modische“ und technische Trends bei Endgeräten induziert sind, werden nicht betrachtet.

⁸⁰ Im GSM-Netz an die BTS (Base Transceiver Station), im UMTS-System an den RNS (Radio-Netzwerk-System oder auch Node B).

- Verkabelung: Die Verkabelung sichert zum einen die Verbindung der Antennen und der Vermittlungstechnik und zum anderen die Stromversorgung der elektrischen Geräte untereinander. Zur Verkabelung sind auch noch Kabelschienen oder Kabelträger hinzuzurechnen.
- Gehäuse (Container): Der größte Teil der Basisstationen wird in Gebäuden untergebracht. Im Out-Door Bereich werden häufig Container verwendet.
- Antennen: Jede Basisstation enthält einen Satz Mobilfunkantennen, die die Signale des Gesprächs empfängt oder weiterleitet.
- Richtfunkverbindungen: Neben den Mobilfunkantennen gibt es zumeist auch noch Richtfunkverbindungen, die zur Kommunikation der Basisstation mit der nächsthöheren Ebene dienen. Zu den Antennen sind auch Fernsteuerungseinheiten (RCU mit Motoren), Stromversorgungs- und Steuerungseinheiten (CCU) sowie Verstärker, elektrische Bauteile und Haltematerialien hinzuzurechnen.
- Masten: Für den Mobilfunk werden vor allem verzinkte Stahl- und Betonmasten verwendet. Die Masten tragen die Antennen.
- Blitzschutzanlage: Alle Mobilfunkstationen müssen mit einem Blitzschutz nach den Blitzschutzklassen II oder III versehen sein. Hierbei kommen vor allem verzinkter Stahl – aber auch Kupfer oder Aluminium – zum Einsatz. Zur Blitzschutzanlage gehören Haltematerialien und ein geringer Anteil an Elektrik.

Unter methodischen Aspekten wurden die induzierten Ressourcenströme der obigen Bestandteile unter den Gesichtspunkten Lebens- und Nutzungsdauer betrachtet. Zum einen wurde zunächst die Lebensdauer der einzelnen Bestandteile der Mobilfunkinfrastruktur ermittelt. Hierbei zeigten sich deutliche Unterschiede zwischen den unterschiedlichen Bestandteilen. Bauliche Elemente wie Container, Masten oder Blitzschutzanlagen haben eine Lebensdauer vom mehr als 25 Jahren bis hin zu 100 Jahren. Elektrische Bestandteile liegen bei 15 und 30 Jahren. Die Computer- und Servertechnik hingegen hat eine geringere Lebensdauer als von fünf Jahren und wird – so die „inoffizielle“ Mitteilung eines Netzbetreibers - aufgrund der oben genannten Entwicklungen zumeist noch früher ausgetauscht. Weiterhin wurde versucht, Informationen über die Nutzungsdauer zu erhalten. Hierzu liegen im Netz kaum verwertbare Informationen vor. Die Netzbetreiber klassifizieren auch derartige Informationen als wettbewerbsrelevant, weshalb sie keine Information hierzu herausgeben.

4.2 Lebens- und Nutzungsdauer von Bestandteilen des BSS und RSS

Über die „Lebensdauer“ einer gesamten Basisstation gibt es nur zwei Schätzungen. Emmenegger schätzt, dass diese eine Lebensdauer von 10 Jahre haben (vgl. Emmenegger et al. 2003:7). Malmödin (2009:3) gibt die Lebensdauer einer „RBS-Site“ (Basisstation) mit 3 bis 20 Jahren an. Diese Werte eignen sich jedoch nur eingeschränkt für eine Untersuchung des Materialflusses, da die einzelnen Komponenten sehr unterschiedliche Lebens- bzw. Nutzungsdauern haben. Generell werden Basisstationen – sofern sie einmal genehmigt sind – aufgrund schwieriger Diskussionen mit Kommunen und der Bevölkerung bei der Einrichtung neuer Stationen nur selten aufgegeben. Basisstationen werden eher kontinuierlich „erneuert“, wobei wesentliche Elemente wie die Masten, Antennen und die Stromversorgung eine deutlich höherer Lebens- und Nutzungsdauer haben als die eigentliche Vermittlungstechnik.

In der folgenden Tabelle sind die Ergebnisse der Recherche über die Lebens- und Nutzungsdauer der obigen Komponenten aufgeführt.

Tabelle 25: Lebens- und Nutzungsdauer verschiedener Elemente von Basis- und Controller-Stationen.

Komponente	Lebensdauer	Nutzungsdauer	Kommentar	Quelle
Racks – Technik-schränke	15 bis 20 Jahre		Technikschränke haben eine deutlich höhere Lebenserwartung von 15-20 Jahren als das elektronische Equipment der Basisstationen. Aufgrund der stetigen Nach- oder Aufrüstung von Basisstationen werden die elektronischen Komponenten so konstruiert, dass sie in die vorhandenen Racks passen.	Jens Leonardt (Knürr Technical Furniture GmbH, Hersteller von Mobilfunk-Technikschränken), Telefoninterview am 23.11.2009
Vermittlungs-technik	2 bis 10 Jahre	2 bis 5 Jahre	Die Lebensdauer der BSC wird von Emmenegger auf 10 Jahre und von ISI/CEPC auf 8 Jahre geschätzt, wobei unklar ist, auf welche Komponenten sich diese Angaben beziehen. Malmodyn gibt die Lebensdauer von „RBS-Sites“ (Basisstationen) mit 3 bis 20 Jahren an. Dell gibt die Nutzungsdauer der Server-Technik von Basisstationen mit 2 bis 5 Jahren an. Telefonische Auskünfte bei anderen Herstellern und Netzbetreibern konnten nicht erlangt werden, da die Daten als „wettbewerbsrelevant“ bezeichnet werden. Es gab jedoch Hinweise, dass 10 Jahre alte Geräte kaum verwendet werden und eher fünf Jahre für die Nutzungsdauer als maximal anzunehmen ist. Aufgrund der unzureichenden Informationen wird mit einer weiten Spanne von 2 bis 10 Jahre für die Lebensdauer und 2 bis 5 Jahre für die Nutzungsdauer gerechnet.	Christian Unger (Service-Abteilung Dell, Hersteller von Servern für Basisstationen), Telefoninterview am 8.12.2009 Erfolgreiche telefonische Anfragen bei T-Mobile, Sony Ericsson und Vodafone am 06.12.2009 Emmenegger 2003:7 ISI/CEPC 2003:177 Malmodyn:3
Stromversorgung	Mittel- und Niederspannungsschaltungen und -anlagen, Transformatoren, Leitungen, Kabel und Verteilungen: 20 bis 30 Jahre Schalter, Mess-, Steuer-, Regelanlagen: 10 bis 20 Jahre		Das Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung (BBR) hat umfangreiche Daten zur Lebensdauer von elektrischen Komponenten zusammengestellt. Relevant für den Mobilfunksektor sind Mittel- und Niederspannungsanlagen und -schaltungen, Transformatoren, Kabel und Stromverteiler. Das BBR gibt die Lebensdauer mit 25 Jahren an. Schalter, Mess-, Steuer- und Regelanlagen der Stromversorgung haben eine geringere Lebensdauer von 15 Jahren.	BBR 2001
Notstromversorgung	Elektrische Komponenten s. Stromversorgung Bleigel-Batterien: 20 Jahre		Elektrische Komponenten s. Stromversorgung Bleigel-Batterien haben je nach Nutzung unterschiedliche Lebensdauern. Industriemodelle, die nur bei Bedarf Energie abgeben, haben eine Lebensdauer von ca. 20 Jahren.	Elektrische Komponenten: BBR 2001 Batterien: Northern Arizona Wind & Sun (o.J.)
Kühlung	7 bis 10 Jahre			Frank Trautmann (stellv. Niederlassungsleiter Düsseldorf für Stulz Klimatechnik, Hersteller von Kühlsystemen für Basisstationen), Telefoninterview am 25.11.2009 Bernhard Gref (Tränker, Hersteller von Kühlsystemen), Telefoninterview am

				30.11.2009
Verkabelung	Leitungen, Kabel und Verteilungen: 20 bis 30 Jahre	10 bis 12 Jahre	Nach dem BBR liegt die Lebensdauer offen verlegter Kabel und Leitungen bei 25 Jahren. Nach Leoni werden die Kabel für unterschiedliche Verlegungsarten (innen, unter Putz, Freileitungen) angefertigt und können somit eine entsprechend lange Lebensdauer von 20-30 Jahren garantieren. Allerdings erfolgt in einem wesentlich kürzeren Zeitraum (10-12 Jahre) eher ein kompletter Austausch der Anlagen bzw. deutliche Umrüstungen, so dass der Kabelsatz einer Basisstation vor dem Lebensdauerende ausgetauscht wird.	Lebensdauer: BBR 2001 Nutzungsdauer: Marcus Buscher (Vertrieb bei Leoni Special Cables, Hersteller von Kabelsystemen für Mobilfunkbasisstationen), Telefoninterview am 02.12.2009
Gehäuse (Container)	Verzinkte Container: ca. 30 bis 40 Jahre (Analogieschätzung)		Das BBR gibt die Lebensdauer von verzinkten Bauinstallationen (Zäune, Schranken, Tore) mit 35 Jahren an. Diese Schätzung lässt sich auch auf Halterungen z.B. von Kabeln oder Antennen bzw. auf Ständerwerk übertragen.	BBR 2001
Antennen	8 bis 15 Jahre			Dipl.-Ing. Ernst Lautner (technisches Marketing im Fachbereich Mobile Communication der KATHREIN-Werke), Telefoninterview am 23.11.2009
Richtfunkverbindungen	8 bis 30 Jahre	15 Jahre	Nach Pan Dacom liegt die Lebensdauer von Richtfunkantennen bei 10 bis 30 Jahren. Nach Reist liegt die Lebensdauer optischer Systeme bei ca. 8 Jahren. Nach Lautner werden Antennen aber nicht länger als 15 Jahre genutzt.	Vgl. Lautner, Pan Dacom Direkt: (o.J.) und Reist (2002) Dipl.-Ing. Ernst Lautner (technisches Marketing im Fachbereich Mobile Communication der KATHREIN-Werke), Telefoninterview am 23.11.2009
Masten	Beton: 70 bis 125 Jahre Aluminium- und Stahlmasten: ca. 35 Jahre	10 bis 15 Jahre	Betonmasten haben eine sehr hohe Lebensdauer. Je nachdem, ob die Masten bekleidet sind (125 Jahre) oder nicht (70 Jahre), kann sich die Lebensdauer sehr unterscheiden. Aluminium- sowie Stahlmasten und -konstruktionen haben eine Lebensdauer von ca. 35 Jahren wenn sie effektiv gegen Korrosion geschützt sind. Emmenegger schätzt die Nutzungsdauer auf 10 bis 15 Jahre.	Betonmasten: Dipl.-Ing. Jürgen Fedder, Planungs- und Baubetreuungsgesellschaft mbH Essen (Spezialist für Mobilfunkarchitektur), Telefoninterview am 23.11.2009 Stahlmasten: BBR 2001 Emmenegger et al. (2003:7)
Blitzschutz	20 bis 30 Jahre			BBR 2001

4.3 Lebens- und Nutzungsdauer von Bestandteilen des NSS

In den Abschnitten zuvor wurden das Base Subsystem und das Radio Subsystem mit den Basis- und den Controllerstationen beschrieben. Die nächsthöhere Ebene ist das Network Switching Subsystem (NSS). Das NSS ist die eigentliche Vermittlungsebene, bei der eingehende Anrufe an den Angerufenen weitergeleitet werden. Im NSS werden auch die Verbindungen mit den anderen Mobilfunknetzen sowie den Festnetzen (Telefon, Internet) geschaltet.

Kernstück des NSS ist das MSC – Mobile Switching System – bzw. SGSN im UMTS-Netz – welches die Verwaltung der Verbindungen und die Nutzerdatenverwaltung übernimmt. Zur Abwicklung der Gespräche nutzt die MSC verschiedene Datenbanksysteme. Darüber hinaus werden die BSC bzw. RNC von den MSC vernetzt und gesteuert. Über den MSC erfolgen auch die Anschlüsse an die anderen Netze (Kabeltelefonie, Internet). Dem MSC sind auch die Schnittstellen zum Festnetz, dem Internet und die anderen Mobilfunknetze zugeordnet. Dies erfolgt über die GMSC Gateway MSC bzw. GGSN Gateway GPRS Support Node.

Als vierte Ebene oberhalb des NSS gibt es noch das OMC Operation and Maintenance Sub-System. Aufgrund der ähnlichen Struktur können die beiden Systeme zusammen behandelt werden. Das OMC steuert zum einen das gesamte Netz. Über das OMC können auch die Wartungsarbeiten an den Teilsystemen vorgenommen werden. In das OMC fallen das NMC Network Management Center, welches die Schnittstelle zwischen der Kundenbetreuung (Administration) und der Netztechnik bildet sowie das OMC Operation Management Center⁸¹, welches das Netz steuert und überwacht. Zu dem OMC zählen die OMC-B, welche die Basisstationscontroller überwachen und die OMC-S, welche die MSC überwachen. Zum OMC zählen auch weitere wichtige Datenbanken. Die Datenbanken sind allerdings physisch bei den MSC angebunden.

Im Unterschied zu den Basisstationen und den Basisstationscontrollern sind MSC und OMC vor allem Rechenzentren mit zahlreichen speziellen Servern. Sie können wie folgt beschrieben werden:

- MSC Vermittlungstechnik: MSC bestehen vor allem aus Kommunikationsservern. Im Prinzip ist eine MSC mit einem Rechenzentrum zu vergleichen.
- MSC Schnittstellensysteme: Die Verbindung in andere Netze, das Festnetz, das Internet oder für Datendienste wird über Schnittstellensysteme wie GMSC, SGSN oder GGSN hergestellt. Diese Systeme sind spezielle Computer. Zumeist mit eigener Kühlung.
- MSC/OMC Datenbanksysteme: In dem HLR (Home Location Register) sind die Daten der Kunden gespeichert für die Gebührenabrechnungen, Zugriffsberechtigung (SIM-Karte) oder aktuelle Einstellungen (z.B. Rufumleitung) des Nutzers. In dem VLR Visitor Location Register – einer „Besucherdatei“ – sind die Adresse und die Rufnummer des Handys gespeichert und werden an die jeweiligen MSC gesendet. In diesem Register wird auch der aktuelle Standort des Nutzers verzeichnet und ständig aktualisiert. In dem EIR – Equipment Identity Register wird die internationale Kennung des Handys hinterlegt um z.B. das Gerät in allen Netzen sperren zu können. Eine weitere Datenbank ist das AuC – Authentication Center, das die Funkschnittstelle abhörsicher machen soll und Verschlüsselungskennzeichen der SIM-Karte enthält und zu deren Identifizierung notwendig ist. Die Datenbanksysteme sind häufig zentral positioniert und finden sich somit nicht in allen MSC.
- OMC: Das OMC ist vergleichbar mit einem Rechenzentrum, welches das gesamte Netz steuert und überwacht. Demzufolge sind die wesentlichen Elemente des OMC Server, Datenbanksysteme, PC's und Schnittstellensysteme zu anderen Netzen.

Über die Lebensdauer der MSC bzw. OMC gibt es nur zwei Schätzungen von Emmenegger et al. (ders. 2007:7) und Malmödin (ders. 2009:9). Emmenegger schätzt, dass die Telefonzentralen mit dem Equipment (z.B. MSC, BSC, GSC und HLR) eine Lebensdauer von 10 bis 15 Jahren haben. Malmödin schätzt, dass die Lebensdauer der sogenannten „Core-Nodes“ (vergleichbar mit MSC) bei 10 bis 20 Jahren liegt. Diese Werte eignen sich jedoch nur eingeschränkt für eine Untersuchung des Materialflusses, da die einzelnen Komponenten sehr unterschiedliche Lebens- bzw. Nutzungsdauern

⁸¹ In der Literatur wird auch häufig der Begriff NMC Network Management Center gebraucht.

haben. Masten, Antennen, Raumkühlungen und die Stromversorgung haben eine deutlich höherer Lebens- und Nutzungsdauer als die eigentliche Vermittlungstechnik.

Zur Bestimmung der Lebensdauer dieser Systeme konnte nur sehr eingeschränkt auf Informationen von Herstellern und Netzbetreibern zurückgegriffen werden, da diese im telefonischen Gespräch als wettbewerbsrelevant bezeichnet und somit nicht für die Öffentlichkeit bestimmt wurden. Es können somit nur Studien über die Lebensdauer von Elementen der Informations- und Kommunikationstechnik herangezogen werden. Allein Dell – das Server für Mobilfunk-Basisstationen herstellt – gab telefonisch die Auskunft, dass die Nutzungsdauer von Servern zwischen 2 und 5 Jahren liegt.

Während der Recherche wurden weitere Informationen zur Lebensdauer von elektronischen Geräten und Bauteilen erlangt, die hier nur der Vollständigkeit halber wiedergegeben werden. Nach Minicom Advanced Systems (ebd. 2008:6) liegt die Lebensdauer eines einfachen PC's bei 3,4 Jahren. Minicom gibt die MTBF⁸² mit ca. 30.000 Stunden an. Nach System Reliability Center (o.J.:1) liegt die MTBF für PC und Server (Workstations) bei 1.000 bis 5.000 Stunden, was maximal 0,58 Jahre entspricht. Harddisk-Laufwerke – die wesentliche Elemente von Datenbank-Servern sind, haben eine MTBF von 10.000 bis 20.000 Stunden. Unter einer Annahme einer durchgängigen Beanspruchung würden dies ca. 1,1 bis 2,2 Jahre sein. Wesentlich für die Nutzungsdauer von elektronischen Geräten wie Servern und Datenbanksystemen, die den größten Anteil der elektronischen Ausstattung der Mobilfunkinfrastruktur stellen, sind jedoch auch die Lebensdauer der einzelnen Bauteile. Nach Intel liegt die Lebensdauer eines Server-Board für den Typ Intel S3000AH bei 32,3 Jahren bei einer Temperatur von 35°C, bei einer Temperatur von 55°C sinkt die Lebensdauer auf 12 Jahre (Intel 2006). Eine Schlüsselkomponente mit höchster Bedeutung bei der Servertechnologie sind ohne Frage die Festplatten zur Speicherung aller wichtiger Daten. Toshiba gibt die Lebensdauer seiner Festplatten mit 160 Jahren (Typ MBA3073FD, ders. o.J.) und Hitachi mit 183 Jahren (Typ Ultrastar 15K600, ders. o.J.) an. Diese Lebensdauer wird jedoch von Schroeder et al. bestritten, da eine MTBF von 1.000.000 h (gleich 114 Jahren) sich nicht in der Praxis bestätigen lässt.

Sowohl die Lebensdauer der einzelnen Geräte als auch die der kritischen Komponenten können jedoch kaum zur Ermittlung eines jährlichen Stoffflusses herangezogen werden. Der wesentliche Grund hierfür ist, dass kontinuierlich neue und leistungsstärkere Technologie auf den Markt kommt, so dass die Vermittlungstechnik zumeist erneuert wird, bevor diese das Ende ihrer Lebensdauer erreicht hat. Dieser Austauschvorgang ist auch davon abhängig, welche Angebote und welche Bedarfe der Markt hat. Getrieben wird er vor allem durch das Angebot immer höherer Bandbreiten, um auch große Applikationen (z.B. Filme) über den Mobilfunk zugänglich zu machen. Da über die Lebensdauer von Vermittlungstechnik keine Daten erlangt werden konnten, wird diese Lebensdauer entsprechend der Auskünfte von Dell generell auf 2 bis 5 Jahre geschätzt.

4.4 Ressourcenflüsse in einem Steady-State-Szenario

Wie in der Einleitung dargestellt, gibt es unterschiedliche Trends, die die möglichen Ressourcenströme im Mobilfunksektor beeinflussen können. In einer ersten Näherung soll kein Ausbau des Mobilfunknetzes erfolgen. Die jährlichen Stoffflüsse werden auf Basis der Lebensdauer bzw. der möglichen Nutzungsdauer grob abgeschätzt.

Da nur bei wenigen Bestandteilen die Lebens- bzw. Nutzungsdauer gleich ist, wird eine weitere Vereinfachung vorgenommen. Der untere Wert der Nutzungsdauer – bzw. der Lebensdauer, wenn kein Wert der Nutzungsdauer vorhanden ist – wird als Minimalwert angenommen und als „Verweildauer_{min}“ bezeichnet. Der obere Wert der Lebensdauer – der immer über der Nutzungsdauer liegt – wird als Maximalwert angenommen und als „Verweildauer_{max}“ bezeichnet.

⁸² Mean Time before Failure, Zeit bis zum ersten Auftreten eines Fehlers.

Hierbei wird eine jährliche Betrachtungsweise der einzelnen Komponenten und nicht des Systems selber gewählt. Eine jährliche Betrachtungsweise für einzelne Komponenten bedeutet, dass sowohl die Verweildauer min. als auch die Verweildauer max. als Grundlage für einen jährlichen Anteil des Austausches genommen wird. Liegt die Verweildauer min. von Mastkonstruktionen beispielsweise bei 35 Jahren, so wird angenommen dass 1/35 d.h. ca. 3 % aller Masten pro Jahr ausgetauscht werden.

Die Verweildauer_{min} wird anschließend mit dem Maximalwert der Massenbilanz und die Verweildauer_{max} wird mit dem Minimalwert der Massenbilanz des Mobilfunksystems multipliziert, um so die möglichen Grenzen der Massenflüsse aufzuzeigen. Berechnet man auf Basis der Mengen- bzw. Massenbilanz unter diesen Voraussetzungen den jährlichen Stofffluss (vgl. Tabelle 26), so ergeben sich die Werte für das GSM bzw. UMTS-System:

Tabelle 26: Stoffflüsse für die Infrastruktur aufgrund unterschiedlicher Verweildauer.

Bestandteil	Verweildauer min. [a]	Verweildauer max. [a]	GSM Min. [t/a]	GSM Max. [t/a]	UMTS Min. [t/a]	UMTS Max. [t/a]	Bestandteil
BTS / RNS							
Racks-Technik	2	5	660	1.925	360	1.080	Elektronik
Racks-Gehäuse	15	20	495	770	270	432	Konstruktion
Stromversorgung							
DC-Stromversorgung	10	20	3	7	2	4	Elektrik
Stromverteiler frei	20	30	35	62	17	32	Elektrik
Stromverteiler Geb.	20	30	82	144	40	74	Elektrik
Notstromversorgung	20	20	26	62	13	32	Batterien
Kühlung							
Innen	7	10	61	103	30	53	Elektrik
außen	7	10	53	88	26	45	Elektrik
Verkabelung							
in Gebäude	20	30	112	392	56	202	Kabel
freistehend	20	30	144	378	72	194	Kabel
Richtfunk	20	30	8	30	4	15	Kabel
Stromanschluss freistehend	20	30	105	185	51	95	Kabel
Kabelschienen	30	40	44	68	21	35	Konstruktion
Kabelschienen	30	40	35	55	17	28	Konstruktion
Verteilerstation	30	40	5	8	3	4	Elektrik
Container	30	40	39	62	19	32	Konstruktion
Antennen							
GSM/UMTS	8	15	72	158	72	162	Elektronik
RCU	8	10	27	39	45	68	Elektronik
CCU	8	10	1	2	7	11	Elektronik
Verstärker	8	10	90	131	45	68	Elektronik
Elektroinstallation	20	30	30	53	15	27	Elektrik
Befestigung	30	40	45	70	23	36	Konstruktion
Richtfunkantennen	8	15	1	3	1	1	Elektronik
RCU	8	10	2	3	1	1	Elektronik
Verstärker	10	20	1	2	0	1	Elektrik
Elektroinstallation	20	30	1	1	0	1	Elektrik
Befestigung	30	40	1	1	0	1	Konstruktion
Masten							
Masten Gebäude	30	40	31	48	15	25	Konstruktion
Masten frei/Anbau	30	40	4	7	2	4	Konstruktion
Masten frei/Stahlrohr	30	40	92	245	79	126	Konstruktion
Masten frei/Stahlgitter	30	40	263	410	128	210	Konstruktion
Blitzschutz							
Ableitung und Fang	20	30	3	26	1	13	Konstruktion
Ableitung und Fang	20	30	5	41	2	21	Konstruktion
Haltematerial	30	40	26	82	13	42	Konstruktion
Verkabelung	20	30	9	33	5	17	Kabel
Elektroinstallation	20	30	1	2	1	1	Elektrik
BSC/RNC							
Racks-Technik	2	5	8,1	189,0	3,5	82,8	Elektronik
Racks-Gehäuse	15	20	6,1	75,6	2,6	33,1	Konstruktion
Kühlanlagen	7	10	-	5,0	-	2,6	Elektrik
DC-Stromversorgung	10	20	0,1	1,7	0,0	0,9	Elektrik
Notstromversorgung	20	20	-	1,1	-	0,5	Batterien
Verkabelung	20	30	0,5	1,7	0,5	1,7	Kabel

Bestandteil	Verweildauer min. [a]	Verweildauer max. [a]	GSM Min. [t/a]	GSM Max. [t/a]	UMTS Min. [t/a]	UMTS Max. [t/a]	Bestandteil
			GSM + UMTS min.		GSM + UMTS max.		
MSC							
Racks Gehäuse	15	20	61,1	81,5	95,3	127,0	Konstruktion
Kühlanlagen	7	10	25,2	36,0	48,0	68,6	Elektrik
Verkabelung	20	30	14,4	21,6	44,8	67,2	Kabel
USV	10	15	20,5	30,8	58,7	88,0	Elektrik
Notstromversorgung	10	15	42,0	63,0	150,0	225,0	Batterien
VLR	2	5	6,3	15,8	9,0	22,5	Elektronik
HLR, AuC, EiR	2	5	37,8	94,5	54,0	135,0	Elektronik
GMSC	2	5	9,1	22,8	26,1	65,3	Elektronik
SGSN und GGSN	2	5	12,0	29,9	22,8	57,0	Elektronik
GGSN	2	5	9,1	22,8	26,1	65,3	Elektronik
weitere Systeme	2	5	170,1	425,3	243,0	607,5	Elektronik
OMC/NMS							
Gateways/Switches	2	5	0,0	0,1	0,0	0,1	Elektronik
Server	2	5	2,1	5,3	2,1	5,3	Elektronik
ACP, Dispatch-PC	2	5	0,2	0,5	0,2	0,5	Elektronik
Racks Gehäuse	15	20	0,3	0,4	0,3	0,4	Konstruktion
Summe			3.000	6.800	2.200	4.800	

Quelle und Anmerkungen: Eigene Berechnungen mit Rundung der Summenwerte.

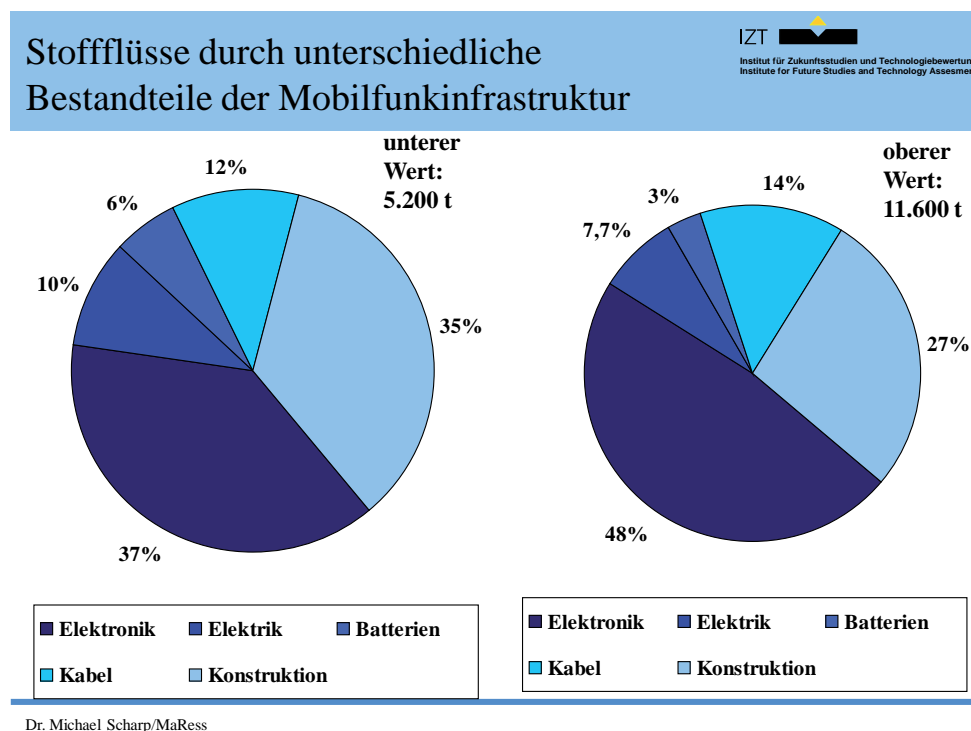
Fasst man die Ergebnisse für das Mobilfunksystem summarisch zusammen und gliedert diese Ergebnisse je nach dem Typ der Komponenten, so ergibt sich der folgende Stofffluss:

Tabelle 27: Jährliche Stoffflüsse durch unterschiedliche Bestandteile der Mobilfunkinfrastruktur (GSM und UMTS, gerundet).

Jährliche Stoffflüsse	Gesamt (t, unterer Wert)	Gesamt (t, oberer Wert)	GSM Min. [t]	GSM Max. [t]	UMTS Min. [t]	UMTS Max. [t]
Elektronik	2.000	5.500	1.100	3.100	900	2.400
Elektrik	500	900	300	500	200	400
Batterien	300	400	100	100	200	300
Kabel	600	1.600	400	1.000	200	600
Konstruktion	1.800	3.200	1.100	2.000	700	1.200
Summe	5.200	11.600	3.000	6.700	2.200	4.900

Quelle und Anmerkungen: Eigene Darstellung. GSM Min bezieht sich auf die Mindestmassen des GSM-Systems, Max auf die Maximalmassen entsprechend der Berechnungen im Kapitel 3.5. UMTS Min bezieht sich auf die Mindestmassen und Max auf die Maximalmassen des UMTS-Systems. Anschließend erfolgte eine Multiplikation der geringsten Verweildauer mit dem Maximalwert der Massenbilanz bzw. der längsten Verweildauer mit dem Minimalwert der Massenbilanz um die Spannbreiten besser aufzuzeigen.

Im Ergebnis zeigt sich, dass der Materialfluss aufgrund der angenommenen Verweildauern zwischen 5.200 und 11.600 t pro Jahr liegen kann. Bei einer Schätzung der Mobilfunkinfrastrukturmasse von ca. 101.000 t (unterer Wert, vgl. Kapitel 3.5) erfolgt ca. 70 % des jährlichen Stoffflusses durch konstruktive und elektronische Bestandteile. Nimmt man die höheren Schätzwerte der Mobilfunkinfrastrukturmasse mit ca. 137.000 t und legt die geringeren Verweildauern der Bestandteile zugrunde, so dominiert der Austausch von Elektronik mit ca. 50 % gefolgt von konstruktiven Bestandteilen (vor allem Gehäuse) mit ca. 25 %. In der folgenden Abbildung werden noch einmal die prozentualen Anteile dargestellt:

Abbildung 14: Prozentuale Stoffflüsse durch unterschiedliche Bestandteile der Mobilfunkinfrastruktur

Quelle: Eigene Darstellung.

4.5 Ressourcenflüsse in einem Ausbau-Szenario für UMTS (UMTS 20XX)

Das inzwischen mehr als 20 Jahre alte GSM-Netz (2G-Standard) ist zwar vielfach technologisch erweitert worden mit GPRS, HSCSD und EDGE (2,5G-Standard, vgl. hierzu NIK 2004:19ff), aber andere Systemtechniken wie das UMTS-System (3G-Standard mit CDMA2000) und seine Nachfolger des 3,5G oder 4G-Standards versprechen ungleich bessere Leistungen und vor allem höhere Bandbreiten (d.h. vor allem höhere Übertragungsraten). Es stellt sich somit nicht die Frage „ob“, sondern „wann“ die neuen Technologien bundesweit verfügbar sind. Paradoxerweise wird es – wie schon heute – zu einer Situation kommen, bei der alle Systeme gleichzeitig am Markt sein werden (vgl. ISI / CEPT 2003:103).

Vor diesem Hintergrund soll ein Szenario zu der Frage entwickelt werden, welche Ressourcenbedarfe zum Aufbau eines flächendeckenden Einsatzes der UMTS-Technik notwendig wären. Der Sinn und Zweck dieses Szenarios ist aufzuzeigen, welche Relevanz die Dualität der Netze im Vergleich zu den zuvor geschätzten Stoffflüssen hat.

Nach den zuletzt im Jahre 2007 veröffentlichten Zahlen der Bundesnetzagentur gab es zum März 2007 insgesamt 67.000 GSM-Basisstationen und in 2009 ca. 39.000 UMTS-Basisstationen.⁸³ Das GSM-Netz ist nahezu flächendeckend, auch wenn es beispielsweise auf einigen Brandenburger Intercity-Verkehrsstrecken der Uckermark häufig schwierig ist, einen Netzanschluss zu erhalten. Nach ISI / CEPT (dies. 2003:101) benötigt das UMTS-System bei gleicher Netzabdeckung wie das GSM-System 2 bis 3-mal so viele Basisstationen. Dies wären zwischen 120.000 und 210.000 Basisstationen je nachdem, welchen Wert man nimmt. Um eine flächendeckende Versorgung von Deutschland

⁸³ ISI / CEPT haben in 2003 geschätzt, dass bis zum Jahre 2010 ca. 80.000 UMTS-Basisstationen mit 330 Vermittlungsstationen aktiv sind (ders. 2003:102). Mit Stand vom 14. Dezember hat die Regulierungsbehörde die Zahl der UMTS-Stationen mit 39.000 angegeben, so dass ca. 70 % der Bevölkerung an das UMTS-Netz angeschlossen waren (Bundesnetzagentur 2009:55).

mit UMTS zu erreichen – wie es bei der Vergabe der UMTS-Lizenzen vereinbart war – müssten nach NIK ca. 30.000 bis 40.000 UMTS-Basisstationen errichtet werden (NIK 2004:77; RegTP 2001). Diese Zahl wurde zwar in 2009 erreicht, aber die neuen UMTS-Stationen dienten vor allem der Ausweitung der Bandbreite in den bevölkerungsreichen Gebieten und nicht der flächendeckenden Versorgung. Bei UMTS ist die Besonderheit, dass die Netzabdeckung anders gesteuert wird als bei GSM, da die Netzabdeckung vor allem durch die Verkehrslast bestimmt wird (atmende Netze).

Vor diesem unsicheren Hintergrund wird die Annahme getroffen, dass bis zum Jahr 20XX die Anzahl der UMTS-Basisstationen auf 50.000 erweitert wird, d.h. zu den für die Mengen- und Massenbilanz angenommenen 36.000 Standorten (siehe Kapitel 2.1.1) sollen noch weitere 14.000 hinzu gebaut werden. Weil das UMTS eine deutlich geringere Reichweite als GSM hat, wird vereinfachend angenommen, dass alle weiteren UMTS-Stationen tatsächlich komplett neu gebaut werden. Diese Annahme lässt sich vor allem damit begründen, dass inzwischen in allen Städten und dichter besiedelten Gemeinden UMTS verfügbar ist (vgl. laptopkarten.de o.J.), aber mit zunehmender Netzbelastung auch in den Städten das UMTS-Netz ausgebaut werden muss. Damit vereinfacht sich die Berechnung in Analogie zur Netzinfrastrukturberechnungen wie in Kap. 3, da alle zusätzlichen UMTS-Basisstationen analog kalkuliert werden und es nicht notwendig ist, zwischen neuen UMTS-Stationen an alten Standorten zu unterscheiden. Entsprechend des Verteilungsschlüssels wie er in Kap. 2.1.1 berechnet wurde, würden dies ca. 8.000 weitere Standorte bedeuten.

Weiterhin wird der Verteilerschlüssel von RNC zu RNS mit 1:100 angenommen, da UMTS eine geringere Reichweite hat und somit die RNS dichter konzentriert stehen. Hierbei kann dann auch eher die höhere Controller-Kapazität genutzt werden. Dies würde dann zusätzliche 140 Controllerstationen erfordern.

Im Rahmen der Netzinfrastrukturberechnungen in Kap. 3 wurden 140 bis 200 MSC in Bezug auf 960 bzw. 2.120 Controllerstationen gesetzt. Dies entspricht einem Verhältnis von 1:7 (Minimalwerte) bis 1:10 (Maximalwert).

OMC müssten im Prinzip nicht neu gebaut werden, da eine OMC auf Basis der Schätzungen (s.S. 53) zuständig wäre für 34 MSC. Der Form halber wird der Neubau der OMC mit 1 beziffert. Für diese Abschätzung wird der Maximalwert genommen, d.h. pro 10 RNC eine zusätzliche MSC.

Beim Vergleich zwischen dem Szenario UMTS-20XX mit dem Szenario UMTS Max. werden gleichfalls für die einzelnen Bauelemente die höheren Wert angenommen beispielsweise bei der Notstromversorgung, der Verkabelung, den Kühlanlagen der BSC oder den Racks für die Vermittlungstechnik.

Somit würden sich folgende Basiswerte für ein Ausbauszenario UMTS-20XX im Vergleich zum Bestand ergeben:

Tabelle 28: Rahmendaten für einen flächendeckend Ausbau des UMTS-Netzes.

	RNS-UMTS	RNC	MSC	OMC
Basisdaten der maximalen Schätzung für das Jahr 2007/2008 (siehe Kap. 2.1.1, 2.1.2 und 2.1.3)	36.000	720	200 (UMTS/GSM)	40
20XX (Neubau, davon gemäß BNA 3.000 bis 2009 gebaut)	14.000	140	14 (UMTS)	1

Quelle: Eigene Darstellung.

Auf dieser Basis wurde die Masse der Infrastruktur für das Szenario UMTS-20XX abgeschätzt. Hierbei wurde so wie zuvor bei der Bestimmung der Massen der Mobilfunkinfrastruktur vorgegangen. In dem Szenario UMTS-20XX wurden jedoch keine Minimal- und Maximalwerte bestimmt, sondern nur die

minimalen Rahmendaten⁸⁴ zur Berechnung der Infrastrukturmassen verwendet, da aufgrund der Vielzahl der Unsicherheiten (Minimal- und Maximalwerte der Ressourcenbilanz sowie Lebens- und Nutzungsdauer mit Minimal- und Maximalwerten) weitere Unsicherheiten das Ergebnis kaum verbessern würden. Zum Vergleich wurden die Infrastrukturbestandteile für den Mobilfunk, wie sie für den Bezugszeitraum 2007/08 ermittelt wurden, gleichfalls aufgeführt sowie die Stoffflüsse aufgrund der geschätzten Verweilzeiten.

Tabelle 29: Infrastrukturmassen und jährliche Stoffflüsse von 2007/2008 im Vergleich mit dem Szenario UMTS-20XX

Vergleich: Bestand - Jährliche Stoffflüsse - Szenario UMTS-20XX	Mobilfunkinfrastruktur 2007/08 (GSM und UMTS, unterer Wert in t)	Mobilfunkinfrastruktur 2007/08 (GSM und UMTS, oberer Wert in t)	Jährliche Stoffflüsse ges. Infrastruktur (unterer Wert, t)	Jährliche Stoffflüsse ges. Infrastruktur (oberer Wert, t)	Szenario UMTS-20XX
Elektronik	12.700	14.800	2.000	5.500	2.000
Elektrik	10.600	12.400	500	900	1.000
Batterien	3.700	4.800	300	400	1.400
Kabel	18.800	32.600	600	1.600	-
Konstruktion	54.800	72.400	1.800	3.200	8.300
Summe	101.000	137.000	5.200	11.600	13.000

Quelle: Eigene Darstellung.

Im Ergebnis zeigt sich, dass ein deutlicher Ausbau des UMTS-Netzes mit Stoffflüssen verbunden ist, die über den geschätzten jährlichen Stoffflüssen auf Basis der Nutzungszeiten für die einzelnen Baugruppen des Mobilfunknetzes liegen. Allerdings würde ein weiterer Ausbau nicht im bedeutenden Maße die Bestandsmassen erhöhen, sondern nur – wie in diesem Beispiel gezeigt – mit zusätzlichen Massen in der Größenordnung von 12 bis 17 % liegen. Einen wesentlichen Anteil an der Massenerhöhung hätten konstruktive Elemente mit ca. 50 % und ca. 25 % Kabelanteil.

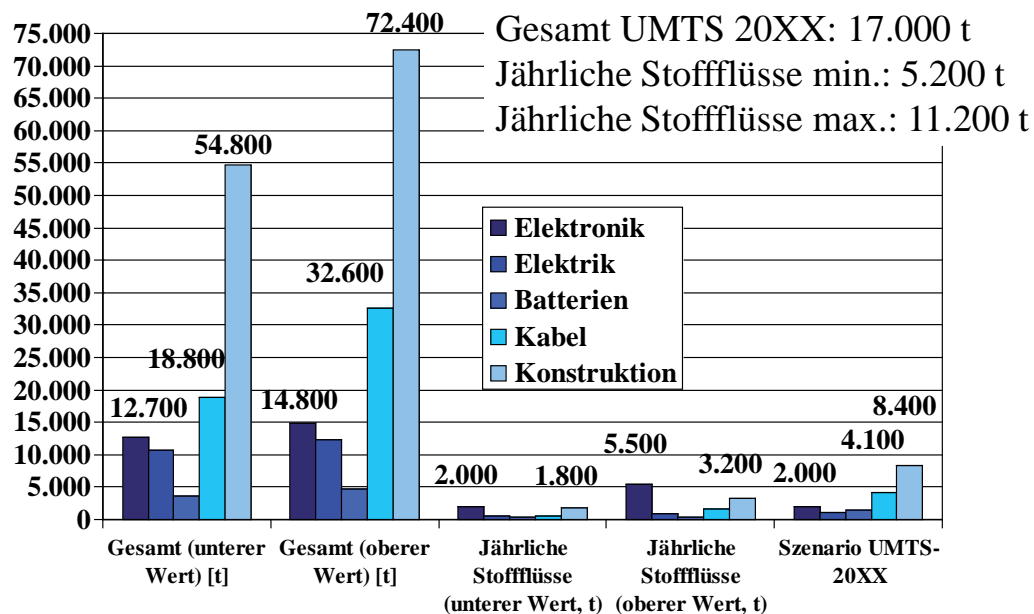
In der folgenden Abbildung sind noch einmal die Ressourcenbedarfe nach den einzelnen Bestandteilen der Mobilfunkinfrastruktur untergliedert sowie für die Bereiche Bestand, Instandhaltung und UMTS-Ausbau dargestellt.

⁸⁴ Im Kap. 3.2 wurden sowohl für UMTS als auch für GSM jeweils unterschiedliche Faktoren bei den einzelnen Elementen der Basisstationen, Controllerstationen und MSC gewählt. Beispielsweise wurde die Verkabelung mit einem Minimal- und Maximalwert berechnet.

Abbildung 15: Infrastrukturmassen und jährliche Stoffflüsse der Jahre 2007/2008 im Vergleich mit dem Szenario UMTS-20XX

Vergleich der Infrastruktur (2007) mit jährlichen Stoffflüssen und UMTS-20XX

IZT
Institut für Zukunftsstudien und Technologiebewertung
Institute for Future Studies and Technology Assessment



Dr. Michael Scharp/MaRes

Quelle: Eigene Darstellung.

4.6 Zusammenfassung der Ergebnisse

Mobilfunk induziert wie jede andere Technik oder Dienstleistung Materialflüsse, da technische Geräte nur eine endliche Lebensdauer haben. Darüber hinaus gibt es jedoch drei spezifische Entwicklungen, die sich unmittelbar auf die Ressourcenbedarfe auswirken:

- Mobilfunk ist essentiell von der Computertechnik abhängig und die Nutzung der besten Technologien ist sehr wettbewerbsrelevant. Es ist anzunehmen – und es wird auch von Mobilfunkexperten bestätigt – dass die Computertechnik bedarfsorientiert und nicht lebensdauerorientiert genutzt wird. Die Elektronik ist somit ein relevanter Faktor bei den jährlichen Stoffflüssen.
- Es gibt einen kontinuierlichen Ausbau der Netze hin zu höheren Mobilfunk-Standards, so dass mehrere Netze parallel existieren. Noch immer erfolgt der Ausbau des UMTS-Netzes, da dies bisher insbesondere in den ländlichen Regionen nicht verfügbar ist. Hierdurch erfolgen zunächst einmal eine Erhöhung der jährlichen Stoffflüsse und eine Steigerung der Infrastrukturmasse. Allerdings ist diese zusätzliche Masse in Bezug auf die vorhandenen Infrastrukturen im Mobilfunk relativ gering.
- Es gibt weiterhin einen Trend zur Miniaturisierung und zur Technikintegration (duale Verarbeitung von GSM und UMTS vor allem in der Vermittlungstechnik), der zu einer Reduzierung der Infrastrukturmasse führt. Da die Vermittlungstechnik jedoch nur 10 bis 13 % der Gesamtinfrastruktur darstellt, wird das Reduktionspotential nicht wirklich groß sein.

Insgesamt erscheinen die jährlichen Stoffflüsse von 5.000 bis 12.000 Tonnen trotz der teilweise geringen Verweilzeiten als nicht besonders groß im Vergleich zu einer Gesamtmasse der Primärinfrastruktur von ca. 100.000 bis 137.000 t. Prozentual gesehen liegen die Stoffflüsse zwischen 5 % und 8 %. Es sind vor allem die elektronischen (Vermittlungstechnik) und konstruktiven Elemente (Gehäuseschränke, Masten), die hierbei wesentliche Stoffflüsse induzieren könnten. Diese relativierende Aussage lässt sich mit einem Vergleich mit dem Austausch von Mobiltelefonen begründen. In

Deutschland gab es in 2008 ca. 107 Mio. Anschlüsse (Handyverträge, BMWi und tns infratest 2009:136). Bei einem geschätzten Gewicht von 150 g pro Geräte – inklusive Ladegerät – ergäbe sich eine Masse der Handys von ca. 16.000 t. Nimmt man eine Nutzungsdauer von 2 Jahren⁸⁵ an, so ergäbe sich ein Ressourcenfluss von ca. 8.000 t allein aufgrund des Austausches von Mobiltelefonen. Somit ergäbe sich ein durch die Konsumenten induzierter Ressourcenfluss, der noch über dem des Szenarios mit den minimalen Verweilzeiten der Infrastruktur liegen würde.

Vergleicht man die Werte der geschätzten jährlichen Ressourcenflüsse sowie die Bestandsinfrastruktur mit einem flächendeckenden Ausbau-Szenario für UMTS im Jahre 20XX, so zeigt sich, dass ein Ausbau die Infrastruktur mit 8.000 Basisstationen und den dazugehörigen RNC und MSC um schätzungsweise 12 % erhöhen würde. Auch ein Ausbau des UMTS-Netzes hin zu einem nahezu flächendeckenden UMTS-Netz würde somit zu einem Stofffluss führen, der in der gleichen Dimension wie die jährlichen Stoffflüsse durch den Erhalt der Infrastruktur liegt.

⁸⁵ Emmenegger et al. Gehen sogar von nur einem Jahr aus (dies. 2003:7).

5 Literatur

- BBOS Bundesanstalt für den Digitalfunk der Behörden und Organisationen für Sicherheitsaufgaben:
Das Projekt Digitalfunk BOS. Online:
http://www.bdbos.bund.de/cln_109/nn_421176/DE/Bundesanstalt/Projekt_Digitalfunk/projekt_digitalfunk_node.html?nnn=true. Zugriff: Januar 2009.
- BBR Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung (2001) Leitfaden Nachhaltiges Bauen. Online:
http://www.bmvbs.de/Anlage/original_8183/Leitfaden-Nachhaltiges-Bauen.pdf. Zugriff Dezember 2009
- Behrendt, S.; Kreibich, R.; Lundie, S.; Pfitzner, R.; Scharp, M (1998): Ökobilanzierung komplexer Elektronikprodukte. Springer: Berlin, Heidelberg, New York.
- Benning (o.J.): Telecom – DC Stromversorgungssysteme. Online: www.benning.de (Downloads).
Zugriff: Februar 2009.
- Benning: Telefonisches Interview mit Hr. Uessler, E-Mail m.uessler@benning.de
- BMW Bundesministerium für Wirtschaft und TNS Infratest Forschung GmbH (2009): Monitoring Informationswirtschaft. 12. Faktenbericht. Infratest: München.
- Brieselang.NET (o.J.): Blitzschutz nach VDE. Online: <http://www.brieselang.net/blitzschutz-nach-vde.php>. Zugriff Februar 2009.
- Bundesnetzagentur (2004): Funk und Umwelt. Regtp facts. Online:
<http://www.bundesnetzagentur.de/media/archive/1030.pdf>. Zugriff: Januar 2009.
- Bundesnetzagentur für Elektrizität, Gas, Telekommunikation, Post und Eisenbahnen (2007): Tätigkeitsbericht 2006/2007 für den Bereich Telekommunikation. Online:
<http://www.bundesnetzagentur.de/media/archive/12186.pdf>, S. 6. Zugriff Dezember 2009.
- Bundesnetzagentur für Elektrizität, Gas, Telekommunikation, Post und Eisenbahnen (2007): Tätigkeitsbericht 2008/2009 für den Bereich Telekommunikation. Online:
http://www.bundesnetzagentur.de/cae/servlet/contentblob/143490/publicationFile/1111/TaetigkeitsberichtTK20082009_Id17897pdf.pdf, S. 6. Zugriff April 2011.
- Burkhardt, Klaus; Eisemann, Jürgen (2005): Technischer Netzbetrieb GSM-R. Signal+Draht: 07/08-2005. Online: http://www.eurailpress.de/ei_detail/number//technischer_netzbetrieb_gsm_r.html.
Zugriff: Januar 2009.
- Commonwealth of Virginia (2007): Contract Modification - Motobridge IP System Overview. Online:
http://www.vsp.state.va.us/downloads/stars_files/Sec_2a_System_Overview_Master_V7_03-21-07_Ver4_Final_CLEAN_03-25-07.pdf. Zugriff: Februar 2009.
- Deutsches Kupferinstitut (2000): Kupfer in der Elektrotechnik – Kabel und Leitungen. Deutsches Kupferinstitut: Düsseldorf.
- ELKO ELEktronik-KompEndium (o.J.): GSM-Systemarchitektur. Online: www.elektronik-kompEndium.de/sites/0910191.htm. Zugriff: Januar 2009.
- Emmenegger, Mireille; Frischknecht, Rolf; Jungblut, Niels (2003): LCA des Mobilfunks UMTS. Uster: ETHZ, Forschungsstiftung Mobilfunkkommunikation.
- Emmenegger, Mireille; Frischknecht, Rolf; Jungblut, Niels (2003): LCA des Mobilfunks UMTS. Uster: ETHZ, Forschungsstiftung Mobilfunkkommunikation.

Emmenegger, Mireille; Frischknecht, Rolf; Jungblut, Niels: LCA des Mobilfunks UMTS. Uster: ETHZ, Forschungsstiftung Mobilfunkkommunikation.

Ericsson (2001): Die Infrastruktur von Mobilfunkdiensten. Ericsson: Düsseldorf. Online: http://www.ericsson.com/de/broschueren/infrastruktur_mobilfunknetze.pdf. Zugriff: Februar 2007.

Faber (o.J.): Produktkatalog. Online: http://faberkabel.ru/de/download/files/katalog_faber.pdf. Zugriff: Februar 2009.

Fasse, Markus: Boeing greift nach Galileo. Handelsblatt, 16. Juni 2008, Nr. 114, S.11

Federico, A.; Masmeci, F; Mancini, D (2001): Material Input per Unit Service of the Italian Mobile Telephone Network. Vortrag auf dem Diskussionsforum "Environmental Impact of Telecommunication and Services". April 2001. Swiss Federal Institute of Technology, Lausanne.

Fraunhofer ISI / CEPC (2003) Der Einfluss moderner Gerätegenerationen der IK'T auf den Energieverbrauch in Deutschland bis zum Jahr 2010. Fraunhofer ISI und CEPCV des Swiss Federal Institutes for Technology im Auftrag des Bundesministerium für Wirtschaft und Arbeit BMWA: Karlsruhe und Zürich.

Fraunhofer ISI / CEPC (2003) Der Einfluss moderner Gerätegenerationen der IK'T auf den Energieverbrauch in Deutschland bis zum Jahr 2010. Fraunhofer ISI und CEPCV des Swiss Federal Institutes for Technology im Auftrag des Bundesministerium für Wirtschaft und Arbeit BMWA: Karlsruhe und Zürich.

Funkschau (2001): UMTS-Systemtechnik im Detail. Funkschau 10/2001. Online: www.funkschau.de. Zugriff: Juni 2008.

Funkschau (2001): UMTS-Systemtechnik im Detail. Funkschau 10/2001. Online: www.funkschau.de. Zugriff: Juni 2008.

navigationssystem.com (o.J.): Galileo Informationen. Online: http://www.galileo-navigationssystem.com/?page_id=111. Zugriff: April 2011.

Griese, Hans-Jörg; Müller, Jutta; Stobbe, Lutz (2004): Fokusthema Mobile Kommunikation. Fraunhofer Institut für Zuverlässigkeit und Mikrointegration: Berlin.

Handelsblatt (2009): Mobilfunkbetreiber erneuern tausende GSM-Basisstationen. Online: www.handelsblatt.com/technologie/it-internet/mobilfunkbetreiber-erneuern-tausende-gsm-basisstationen;1225907. Zugriff: Januar 2009.

Hilty, Lorenz; Behrendt, Siegfried; Binswanger, Mathias; Bruinink, Arend; Erdmann, Lorenz; Fröhlich, Jürg; Köhler, Andreas; Kuster, Niels; Som, Claudia; Würtemberg, Felix (2003): Das Vorsorgeprinzip in der Informationsgesellschaft – Auswirkungen des Pervasive Computing auf Gesundheit und Umwelt. TA-SWISS: Bern.

Informationszentrum Mobilfunk IZMF (o.J.): Wie funktioniert Mobilfunk, Online: www.izmf.de/html/de/244.html. Zugriff Januar 2009.

Intel (2006): Intel Server Boards S3000AHLX, S3000, AH, and S3000AHV. Technical Specification. Online: [ftp://download.intel.com/support/motherboards/server/s3000ah/sb/s3000ah_tps_1_1.pdf](http://download.intel.com/support/motherboards/server/s3000ah/sb/s3000ah_tps_1_1.pdf). Zugriff: Dezember 2009.

IT Wissen – Online Lexikon für Informationstechnologie. Datacom Buchverlag GmbH: Petershofen.

Kathrein: Telefonisches Interview mit Hrn. Otmar Seubert, E-Mail otmar.seubert@kathrein.de

- laptopkarten.de (o.J.): UMTS Abdeckung: Qualitätsunterschiede bei Netz-Abdeckung der Anbieter. Online: <http://www.laptopkarten.de/UMTS-Netzabdeckung/umts-abdeckung.html>. Zugriff: Dezember 2009.
- Malmodin, Jens (2009): Life Cycle Assessment of ICT. Vortrag auf der Konferenz "ICTs, the Environment and Climate Change", OECD conference 2009. Ericsson Research. Online: www.lcm2007.org/presentation/Mo_3.11-Malmodin.pdf. Zugriff: Dezember 2009.
- MGE (o.J.): Dreiphasige USV-Serie – Galaxy PW. Online: http://www.mgeups.de/downloads/docs/MGE_Galaxy_PW.pdf. Zugriff: Dezember 2009.
- Minicom Advanced Systems (2008): Cost Ramifications of Player Placement in Digital Signage Networks. Online: <http://www.techdata.com/techsolutions/displayprojectors/Files/Minicom%20Player%20Placement%20March%2017-2008.pdf>. Zugriff: Dezember 2009
- Motorola (o.J.): Motobridge IP Interoperable Solution. Online: http://www.vsp.state.va.us/downloads/stars_files/Sec_6_Specs_Master_FINAL_6-7-05.pdf. Zugriff: Februar 2009.
- Network Computing (2008): O2 setzt auf Mobilfunkausrüstung von Huawei. Online: <http://www.networkcomputing.de/o2-germany-setzt-auf-mobilfunkausruestung-von-huawei/>. Zugriff: Januar 2009.
- NIK 2004: Fokusthema Mobile Kommunikation. NIK Nachhaltigkeit in der Informations- und Kommunikationstechnik; DLR und IZM Fraunhofer Institut für Zuverlässigkeit und Mikrointegration.
- Nortel (2005): Product Brief – Nortel BSC 3000 und TCU 3000. Nortel: Berkshire UK. Online: <http://www.nortel.com/solutions/wireless/collateral/66179.13-050505.pdf>. Zugriff: Januar 2009.
- Northern Arizona Wind & Sun (o.J.): Battery Types Used in Solar Electric Systems. Online: http://www.windsun.com/Batteries/Battery_types.htm. Zugriff: Dezember 2009
- Nuera (2006): GX-3X. Online: <http://www.nuera.com/Products/GX-3K.pdf>. Zugriff Februar 2009.
- O2 (o.J.): Wie funktioniert Mobilfunk? Online: <http://www.de.o2.com/ext/portal2/online/14427/index>. Zugriff Januar 2009.
- O2 (o.J.): Das neue Netz von O2. Online: <http://www.o2online.de/nw/support/mobilfunk/netz/netzabdeckung.html>. Zugriff: April 2011.
- Oerlikon (2007): 2CP1000 Compact-Power Towerlines. Online: http://www.accuoerlikon.com/pdf/datenblatt/2007/towerline/T_2CP1000_DE_20071127.pdf. Zugriff: Dezember 2009.
- Pan Dacom Direkt: Richtfunk – Richtfunknetzwerk – RiFu. Online: <http://www.pandacomdirekt.com/de/loesungen/richtfunk/richtfunk-netzwerke.html>. Zugriff am 06.12.2009.
- Radio Frequency System (o.J.): Base Station Antenna Systems – Catalog. Online: http://www2.rfsworld.com/RFS_Edition4/RFS_home.htm. Zugriff: Januar 2009.
- Reder, Bernd (2008): O2 Germany setzt auf Mobilfunkausrüstung von Huawei. Online: <http://www.networkcomputing.de/o2-germany-setzt-auf-mobilfunkausruestung-von-huawei/>. Zugriff Februar 2008.
- RegTP Regulierungsbehörde für die Telekommunikation und Post (2001): Lizenzklasse 1 – Digitaler, zellulärer Mobilfunk. Bonn: Regulierungsbehörde für die Telekommunikation und Post.

- Reist, Beate, Pfister, Patrick, Bellin, Christoph (2002): Studie über optische Richtfunkverbindungen. Online: http://www.kaos.ch/sors/SORS_HQ.pdf. Zugriff: Dezember 2009.
- RFS Radio Frequency Systems (o.J.): Celluflex Foam and Heliflex Air Cables. Online: http://www2.rfsworld.com/RFS_Edition4/pdfs/Cable_Intro_23-29.pdf. Zugriff: Februar 2009.
- Scharnhorst, Wolfram (2006): Life Cycle Assessment of Mobile Telefon Networks. EPFL: Lausanne.
- Schroeder, Bianca; Gibson, Garth (2007): Disk Failures in the Real World: What Does an MBTF for 1,000,000 Hours Meant to You?. Online: http://db.usenix.org/events/fast07/schroeder/schroeder_html/index.html. Zugriff Dezember 2009.
- Stich (2008): Stich – S2 – flutlichtfußball2008. Online: <http://www.flutlichtanlagen.at/Downloads/Katalog-Flutlichtanlagen-2008/flutlichtanlagen-katalog-2008.pdf>. Zugriff: Februar 2009.
- Telekom (2006): Geschäftsbericht 2006. Bonn: Telekom.
- Telekom (o.J.): Statistische Daten 2005. Telekom: Bonn. Online: <http://www.telekom.de/dtag/cms/content/dt/de/9538.jsessionid=45046896FC2D339CDB8E29368B16FADC>. [Zugriff: Januar 2007].
- TKD (o.J.): TKD-Datenblätter - Elektronikleitungen. Online: http://www.tkd-gruppe.de/module-itevoCORE-viewPubList-pt_name-tkdCABLEDATA-group-02.html. Zugriff: Februar 2009.
- TNS Infratest Forschung GmbH (2006): Monitoring Informationswirtschaft. Infratest: München.
- TNS Infratest Forschung GmbH (2007): Monitoring Informationswirtschaft. Infratest: München.
- Toshiba (o.J.): Toshiba SDD Product Detail. Online: http://storage.toshiba.eu/cms/de/hdd/product_overview/product_detail.jsp?productid=316. Zugriff Dezember 2009.
- T-Systems (2008): Einsatz für e-CEBIUS. Online: www.t-systems.de/tsi/de/552428/Startseite/UeberTSystems/Best-Practice-Online/Ausgabe-04-2008/Projects-05/Projects-05. Zugriff: Januar 2009.
- Weberskirch, Jürgen (2001): Blitzschutz von Mobilfunkanlagen. Online: <http://www.blitzschutz.com/infos/artikel/011/index.htm>. Zugriff: Februar 2009.
- Wersig, Gernot (2000): Informations- und Kommunikationstechnologie. UVK Medien: Konstanz.
- Wikipedia (o.J.) : Base Transceiver Station. Online: http://de.wikipedia.org/wiki/Base_Transceiver_Station. Zugriff: Januar 2009.
- Wikipedia (o.J.) : Node B. Online: http://de.wikipedia.org/wiki/Node_B. Zugriff 2009.
- Wikipedia: E-plus. Online: <http://de.wikipedia.org/wiki/E-Plus>. Zugriff: Januar 2009.
- Wilen, Per (o.J.): The RBS 2206 – A flexible ticket to the third-generation wireless systems. Online: http://www.ericsson.com/ericsson/corpinfo/publications/review/2000_02/files/2000024.pdf. Zugriff: Januar 2009
- Wittmer, Dominic (2006): Kupfer im regionalen Ressourcenhaushalt – Ein methodischer Beitrag zur Exploration urbaner Lagerstätten. Dissertation. Eidgenössische Technische Hochschule Zürich: Zürich.

Leitung

Stefan Bringezu (WI)

AS2.1: Umweltrelevante metallische Rohstoffe

Dominic Wittmer (WI), Michael Scharp (IZT), Stefan Bringezu (WI),
Michael Ritthoff (WI), Martin Erren (WI), Christoph Lauwigi (Ifeu),
Jürgen Giegrich (ifeu)

AS2.2: Weltweite Wiedergewinnung von PGM

Rainer Lucas (WI), Henning Wilts (WI), Stefan Bringezu (WI)

AS2.3: Materialbestand und Materialflüsse in Infrastrukturen

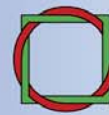
Sören Steger (WI), Miriam Fekkak (WI), Stefan Bringezu (WI),
Michael Scharp (IZT)

Metallische Rohstoffe, weltweite Wiedergewinnung von PGM und Materialien für Infrastrukturen

Zusammenfassung

Zusammenfassung der Ergebnisse des Arbeitspakets 2 des
Projekts „Material-effizienz und Ressourcenschonung“ (MaRess)





Wuppertal Institut
für Klima, Umwelt, Energie
GmbH

**Wuppertal Institut
in Kooperation mit**

BASF
Borderstep
CSCP
Daimler
demea – VDI / VDE-IT
ECN
EFA NRW
FhG IAO
FhG UMSICHT
FU Berlin
GoYa!
GWS
Hochschule Pforzheim
IFEU
Institut für Verbraucherjournalismus
IÖW
IZT
MediaCompany
Ökopool
RWTH Aachen
SRH Hochschule Calw
Stiftung Warentest
ThyssenKrupp
Trifolium
TU Berlin
TU Darmstadt
TU Dresden
Universität Kassel
Universität Lüneburg
ZEW

Kontakt zu den Autor(inn)en:

Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie GmbH
42103 Wuppertal, Döppersberg 19

AS2.1: Dominic Wittmer
Tel.: +49 (0) 202 2492 -181, Fax: -138
Mail: Dominic.Wittmer@wupperinst.org

AS2.2: Rainer Lucas
Tel.: +49 (0) 202 2492 -260, Fax: -138
Mail: Rainer.Lucas@wupperinst.org

AS2.3: Sören Steger
Tel.: +49 (0) 202 2492 -162, Fax: -138
Mail: Sören.Steger@wupperinst.org

**„Materialeffizienz und Ressourcenschonung“
(MaRess) – Projekt im Auftrag des BMU | UBA**

Projektlaufzeit: 07/2007 – 12/2010

Projektleitung:

Dr. Kora Kristof / Prof. Dr. Peter Hennicke

Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie GmbH
42103 Wuppertal, Döppersberg 19

Tel.: +49 (0) 202 2492 -183 / -136, Fax: -198 / -145
Mail: kora.kristof@wupperinst.org
peter.hennicke@wupperinst.org

© Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie GmbH

Weitere Informationen zum Projekt

„Materialeffizienz und Ressourcenschonung“ (MaRess)
finden Sie unter **www.ressourcen.wupperinst.org**

Gefördert wird das Vorhaben im Rahmen des UFOPLAN
durch das BMU und das UBA, Förderkennzeichen: 3707 93 300

Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung
liegt bei den Autor(inn)en.



Bundesministerium
für Umwelt, Naturschutz
und Reaktorsicherheit

**Umwelt
Bundes
Amt** 
Für Mensch und Umwelt

Metallische Rohstoffe, weltweite Wiedergewinnung von PGM und Materialien für Infrastrukturen

Zusammenfassung

Inhaltsverzeichnis

Vorwort	3
1 Umweltrelevante metallische Rohstoffe (AS2.1)	5
1.1 Problemstellung und Ziele des Teilprojektes	5
1.2 Ergebnisse	6
1.2.1 Klassifizierung der Metalle hinsichtlich Kriterien zur Umweltrelevanz und Seltenheit	6
1.2.2 Vertiefende Untersuchung zu zehn ausgewählten Metallen	6
1.3 Handlungsoptionen	9
2 Weltweite Wiedergewinnung von PGM (AS2.2)	12
2.1 Problemstellung und Ziele des Teilprojektes	12
2.2 Ergebnisse	13
2.2.1 Rahmenbedingungen und Trends im PGM-Recycling	13
2.2.2 Untersuchungsschwerpunkt „PGM-Rückgewinnung aus Autoabgaskatalysatoren“	15
2.2.3 Untersuchungsschwerpunkt „PGM-Rückgewinnung aus Elektro- und Elektronikgeräten“	17
2.3 Übergreifende Aspekte eines internationalen Governance-Ansatzes zur Steuerung der Stoffströme im PGM-Recycling	19
3 Materialbestand und Materialflüsse in Infrastrukturen (AS2.3)	21
3.1 Problemstellung und Ziele des Teilprojektes	21
3.2 Zusammenfassung der Ergebnisse	22
3.2.1 Verkehrsinfrastruktur	22
3.2.2 Wasser- und Abwasserinfrastruktur	23

3.2.3	Energieinfrastruktur (Elektrizität, Gas, Wärme)	24
3.2.4	Telekommunikationsinfrastruktur	25
3.3	Handlungsempfehlungen zur Reduzierung der jährlichen Materialströme für leitungsgebundene Infrastrukturen und weiterer Forschungsbedarf	26
Literatur		28

Abbildungen

Abb. 1.1:	Referenz-Metallsystem zur Darstellung der Metallkreisläufe und ihrer Verluste	7
Abb. 2.1:	Verbleib der in Deutschland endgültig stillgelegten Fahrzeuge im Jahr 2008	16

Tabellen

Tab. 1.1:	Übersicht über die relativen Verluste innerhalb der einzelnen Prozesse sowie den gesamten jährlichen Materialverlust der untersuchten Metalle	8
Tab. 2.1:	Entwicklung des globalen Verbrauchs von Platin, Palladium und Rhodium bezogen auf unterschiedliche Anwendungsfelder (2008-2010) in Tonnen	14

Vorwort

Um die Erfordernisse und Möglichkeiten der Ressourceneffizienzsteigerung in wichtigen, bislang unzureichend erforschten Bereichen zu ermitteln, wurde die Wissensbasis zu **umweltrelevanten metallischen Rohstoffen**, zur **Wiedergewinnung von Platingruppenmetallen** sowie zu den in **Infrastrukturen** gebundenen Rohstoffen verbessert und auf mögliche Handlungsoptionen analysiert. Die Ergebnisse zeigen, dass es bei vielen Metallen noch erhebliche Materialverluste und Umweltbelastungen entlang der Gewinnungs-, Verarbeitungs-, Nutzungs- und Recyclingkette gibt, die durch geeignete Maßnahmen vermindert werden können. Rücknahme-, Sammel- und Aufbereitungssysteme gilt es insbesondere in den Bereichen zu fördern, in denen Produkte (neu, gebraucht oder als Abfall) in Länder exportiert werden, in denen bislang keine hinreichende Verwertung stattfindet. Im Inland bestehen wiederum erhebliche Potenziale der künftigen Nutzung von Sekundärrohstoffen, wenn die Art und Menge der in Infrastrukturen gespeicherten Materialien, ihre absehbare Verwendungsdauer und der künftige Ort des Abfallanfalls künftig regelmäßig erhoben werden, um so die Grundlage für ein "Urban Mining" zu legen, das wirksam zur Schonung natürlicher Ressourcen beiträgt.

1 Umweltrelevante metallische Rohstoffe (AS2.1)

1.1 Problemstellung und Ziele des Teilprojektes

Metallische Rohstoffe sind bedeutend für eine Vielzahl technischer Anwendungen. Mit dem Fortschritt der Technik in vielen Bereichen weitete sich der Einsatz von Metallen in den letzten Jahrzehnten rasant aus (mehr Anwendungen, mehr Metalle). Entsprechend wird heute das Gros der ca. 60 Metalle technisch routinemäßig eingesetzt. Neben die bekannten Eisen- und Buntmetalle, die bezogen auf die eingesetzte Menge dominieren, sind eine Vielzahl von Metallen getreten, die überwiegend für spezifische Funktionen in geringen Mengen eingesetzt werden. In diesem Sinne können sie als *selten* bezeichnet werden. Weiterhin sind diese Metalle wegen ihrer teilweise begrenzten Verfügbarkeit in der Diskussion – deshalb werden einige von ihnen auch als kritische Metalle bezeichnet. Typische Anwendungsbereiche mit jeweils starken Zuwachsraten sind Elektro- und Elektronikgeräte (EuE, inkl. IKT¹ und PV²-Technologie), Medizintechnik und Nanotechnologie.

Da diese seltenen Metalle bislang deutlich weniger Aufmerksamkeit in der Fachliteratur erhielten als Eisen- und Buntmetalle, ist auch die Informationslage zu Ihnen relativ eingeschränkt. Das gilt insbesondere auch für die mit ihrem Einsatz verbundenen Umweltbelastungen und Materialverluste über den Lebensweg sowie ihre Bedeutung im sozio-industriellen Metabolismus. Übergeordnetes Ziel des MaRes-Arbeitsschrittes "Umweltrelevante metallische Rohstoffe" ist die Verbesserung der Wissensbasis zu den seltenen Metallen und damit die Schließung von Wissenslücken, um die Entwicklung geeigneter Strategien und Maßnahmen bezüglich Vermeidung, Substitution, ressourcenschonender Produktion und Kreislaufschließung (inkl. internationaler Aspekte) zu unterstützen. Hierzu wurden folgende Arbeitsschritte durchgeführt:

- Screening potenziell umweltrelevanter Metalle: 66 Metalle³ bzw. Metallgruppen wurden hinsichtlich der Kriterien Reservenmenge, statische Reichweite, jährliche Produktionsmenge, Rohstoffpreis, geographische Konzentration von Produktion und Reserven, dissipative Nutzung, Umweltrelevanz (anhand von KRA, KEA und TMR) sowie des Einsatzbereiches analysiert. Anhand ausgewählter Kriterien wurden zehn im Projekt vertiefend zu untersuchende Metalle identifiziert.
- Vertiefende Analyse der zehn ausgewählten potenziell besonders relevanten Metalle: Zehn Metalle wurden genauer hinsichtlich ihrer lebenszyklusweiten Materialverluste und spezifischen Umweltbelastungen mithilfe einer einfachen Stoffflussanalyse untersucht.

¹ IKT: Informations- und Kommunikationstechnologie

² PV: Photovoltaik

³ Nicht untersucht wurden die Nichtmetalle, die Lanthanide und die Actinide.

- Handlungsoptionen: Ausgehend von den vertiefenden Untersuchungen wurden geeignete Maßnahmen und Strategien zur Verringerung der Materialverluste und Umweltbelastungen entlang des Lebenszyklus erarbeitet.

1.2 Ergebnisse

1.2.1 Klassifizierung der Metalle hinsichtlich Kriterien zur Umweltrelevanz und Seltenheit

Insgesamt wurden 66 Metalle nach verschiedenen Kriterien untersucht. Folgende Ergebnisse wurden hierbei zusammengeführt:

- Übersicht über die Einsatzbereiche mit Angabe der relativen Anteile am Gesamteinsatz; dazu Kurzbeschreibung des Einsatzes in den Bereichen EuE/IuK, Med und Nano;
- Produktion, Reserven, Reservenbasis und statische Reichweite;
- Geographische Konzentration der Primärproduktion und der Reserven;
- Bestimmung der dissipativen Nutzung und anderer problematischer Nutzungsmuster der Metalle;
- Kumulierter Rohstoffaufwand (KRA), Globaler Materialaufwand (TMR) und Kumulierter Energieaufwand (KEA).

Die Messgrößen KRA und KEA wurden Umweltprofilen entnommen, die im UBA-Projekt "Indikatoren/ Kennzahlen für den Rohstoffverbrauch im Rahmen der Nachhaltigkeitsdiskussion" erarbeitet wurden; die Ermittlung des TMR basiert auf durch das Wuppertal Institut durchgeführte Untersuchungen.

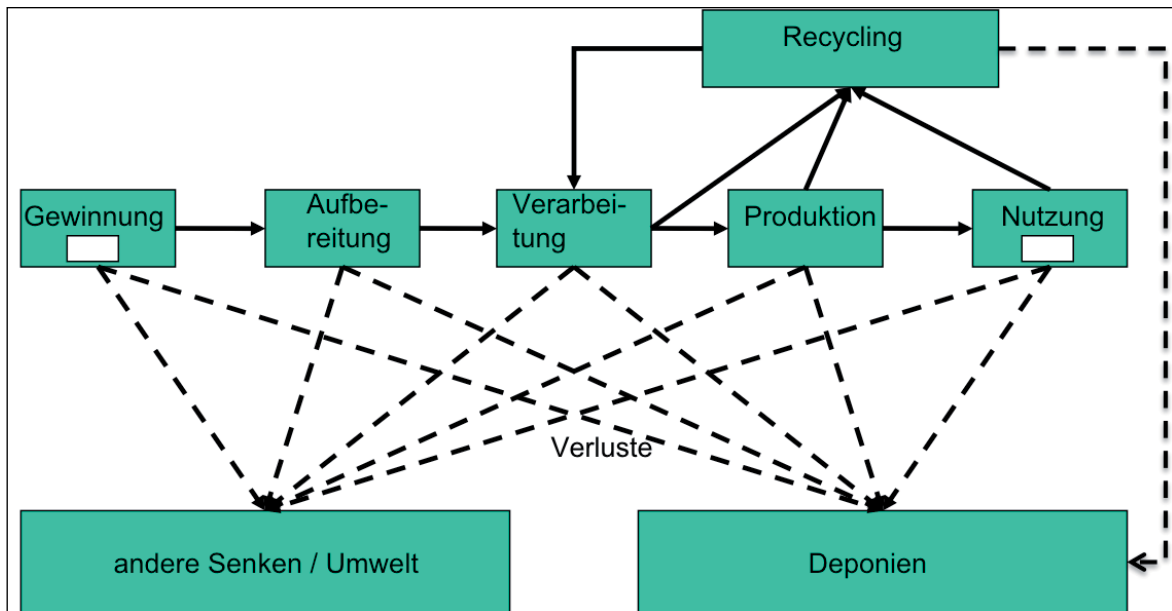
Als Kriterien für die Metallauswahl wurden die Größen KRA, KEA und TMR in Kombination mit der statischen Reichweite und der dissipativen Nutzung gewählt, wobei auch die zu erwartende künftige Entwicklung der Produktion der Metalle berücksichtigt wurde. Auf Grundlage der Klassifizierung der Metalle entlang der Kriterien wurden zehn vertiefend zu untersuchende Metalle ausgewählt: die Edelmetalle Silber (Ag), Gold (Au), Palladium (Pd), die Stahlveredler Mangan (Mn) und Nickel (Ni), die Schwermetalle Zinn (Sn), Zink (Zn) sowie die "Spezialmetalle" Gallium (Ga), Indium (In) und Titan (Ti).

1.2.2 Vertiefende Untersuchung zu zehn ausgewählten Metallen

Die Untersuchung des globalen Stoffhaushalts über den gesamten Lebenszyklus erfolgte für jedes der zehn Metalle nach dem gleichen Schema, um die Vergleichbarkeit zwischen den Metallen zu erhöhen (Abbildung 1). Für jeden Prozess des Systems wurden über den Lebenszyklus zum einen die relevanten Metallverluste und zum anderen relevante spezifische Umweltbelastungen bestimmt; diese Zusammenfassung

konzentriert sich auf die Metallverluste, die eine Erhöhung der Primärproduktion und der damit in der Regel verbundenen erhöhten Umweltbelastungen bedeuten⁴.

Abb. 1.1: Referenz-Metallsystem zur Darstellung der Metallkreisläufe und ihrer Verluste



Die unerwünschten Metallflüsse (Verluste) sind gestrichelt dargestellt. Die weißen Kästen sind Lager (stocks) des entsprechenden Metalls.

Die Stoffflusssysteme der einzelnen Metalle variieren wie erwartet stark. Bezogen auf die Materialverluste ergab sich folgendes, differenziertes Bild:

- *Relativer Materialverlust aus der Nutzungsphase:* Dies ist der jährliche Materialverluste aus Nutzung und Recycling bezogen auf den jährlichen Input in die Nutzung. Er schwankt um den Faktor 8; so beträgt er bei Zinn über 70 %, bei Gold weniger als 10 %; es handelt sich also um das minimale Recyclingpotenzial, das während Nutzungsphase und Recycling besteht⁵ (es würde durch weitere im Inland angesiedelte Prozesse erhöht);
- *Relativer Gesamtmaterialverlust:* Dies ist der gesamte jährliche Materialverlust entlang des Lebensweges bezogen auf den jährlichen Input in die Nutzung⁶. Er be-

⁴ Eine vollständige Beschreibung sämtlicher Umweltbelastungen konnte im Rahmen dieser Untersuchung aufgrund der vielfältigen Prozesse bei der Herstellung und der Nutzung der Metalle nicht erfolgen.

⁵ Insofern befindet sich dieses Potenzial im Allgemeinen im Einflussbereich nationaler Politik, im Gegensatz zu den Potenzialen von Prozessen, die im Ausland statt finden und im "relativen Gesamtmaterialverlust" zusätzlich enthalten sind.

⁶ Aufgrund der Bezugnahme zum Input in die Nutzung sind Relationen über 100 % möglich.

trägt zwischen ca. 110% bei Mangan und ca. 20% bei Gold; es handelt sich also um das maximale Recyclingpotenzial, das global besteht.

Die Verluste der anderen Metalle liegen jeweils zwischen den Extremwerten. In der Studie wurde ferner dargestellt, in welchen Lebenszyklusabschnitten die relevanten Materialverluste auftreten (Tabelle 1). Es ist zu beachten, dass die Umweltrelevanz der Materialverluste beim Vergleich zwischen den Metallen variiert⁷, jedoch für einen Vergleich der spezifischen Umweltbelastungen, welche den Materialverlusten zugeordnet werden können, die Datenlage nicht ausreichte. Hier sind weitere Arbeiten zur Verbesserung der Datenlage erforderlich.

Tab. 1.1: Übersicht über die relativen Verluste innerhalb der einzelnen Prozesse sowie den gesamten jährlichen Materialverlust der untersuchten Metalle⁸

Die Symbole kennzeichnen die Bedeutung der Verluste aus den einzelnen Prozessen:
xxx = Anteil grösser 25 %, xx = Anteil zwischen 25 und 10 %, x = kleiner 10 %, o = keine nennenswerten Verluste, k.A. = keine Angabe

	Mn	Sn	Pd	In	Ni	Ag	Zn	Au
Gewinnung	o	o	xx	k.A.	xxx	xx	k.A.	xxx
Aufbereitung	xxx	xx	x	xxx	xx	xx	xxx	k.A.
Verarbeitung	xxx	x	x	k.A.	xx	k.A.	k.A.	k.A.
Produktion ⁹	x		x	x	x	k.A.	xx	xx
Nutzung	xx	xxx	xx	x	xxx	xxx	X	x
Recycling ¹⁰	k.A.	k.A.	xxx	x	k.A.	xx	k.A.	xxx

Bezogen auf den Input in die Nutzung betragen die lebenszyklusweiten Materialverluste (Werte gerundet auf 5 %):

Relativer jährlicher Verlust [%]	110	80-85	65	50	40-45	35	30	15-20
---	------------	--------------	-----------	-----------	--------------	-----------	-----------	--------------

⁷ Die Umweltbelastungen sind sowohl metallspezifisch, als auch prozessspezifisch, da der "ökologische Rucksack" mit Fortschreiten der Prozesse wächst.

⁸ Für eine Beurteilung der Verluste von Gallium und Titan lagen keine ausreichenden Ergebnisse vor, auf eine Darstellung wurde daher verzichtet.

⁹ Produktion umfasst gegebenenfalls die Raffination.

¹⁰ Inklusive sog. „downcycling“, bei dem das Metall seine spezifische Funktionalität verliert. In der Regel ist damit ein deutlicher Wertverlust verbunden.

1.3 Handlungsoptionen

Seit einigen Jahren und verstärkt während der Projektlaufzeit wurden diverse Fachartikel mit Bezug zu den Stoffströmen von seltenen und edlen Metallen veröffentlicht. Diese beschäftigen sich überwiegend mit den Möglichkeiten, das Recycling aus technischer, logistischer und institutioneller Sicht zu verbessern¹¹. In Kombination mit den spezifischen in den zehn Studien im Rahmen dieser Arbeit ermittelten Recyclingpotenzialen¹² wurde folgendes, nicht abschließendes Set von Handlungsoptionen metallübergreifend betrachtet:

- Erhöhung der Sammelmenge von Altprodukten, die seltene Metalle in relevanten Mengen enthalten, in Deutschland und im Ausland; zum Beispiel von Elektroaltgeräten, die signifikante Mengen an Palladium, Gold und Silber enthalten, sowie von Altbatterien hinsichtlich ihres Mangangehaltes;
- Aufbau bzw. Adaption bestehender produktgruppenspezifischer Sammelsysteme z.B. für Kfz¹³ oder IKT, in Entwicklungsländern durch staatliche oder privatwirtschaftliche Programme, um ein anschließendes Recycling unter Anwendung der best available techniques vor Ort oder in entwickelten Ländern¹⁴ zu ermöglichen; dabei Bewahrung funktionierender Sammelsysteme mit günstigen Beschäftigungseffekten und Verminderung von Gesundheits- und Umweltbelastungen im informellen Recyclingsektor;
- Aufbau von länderübergreifenden Redistributionssystemen für Schrotte spezifischer Produktgruppen, welche für die Bewirtschaftung seltener Metalle relevant sind; zum Beispiel sollten im Rahmen der Ausweitung der Produktverantwortung für Katalysatoren in Altfahrzeugen die Sammelleistung in Ländern unterstützt werden, wo die Materialverluste am größten sind. Mögliche Maßnahmen sind die logistische Unterstützung von Sammelsystemen, Fachschulungen oder Abnahmevereinbarungen; mögliche Adressaten sind Hersteller von Fahrzeugen und/oder Katalysatoren bzw. Recyclingspezialfirmen (via freiwillige Selbstverpflichtung) (vgl. AS2.2); Anreiz für die Adressaten könnte die Sicherstellung langfristiger Sekundärrohstofflieferungen sein;
- Förderung einer tiefergehenden händischen bzw. automatisierten Zerlegung und Sortierung von Altgeräten, die eine seltene Metalle in relevanter Menge enthalten und bei denen die Rückgewinnungsrate erhöht werden kann, z. B. von Elektronik-

¹¹ Die in die Untersuchung einbezogene Literatur ist im Abschlussbericht des AS2.1 erläutert.

¹² Es ist zu beachten, dass die Materialverluste in dieser Studie als "theoretisches" (das bedeutet maximal zu vermutendes) Potenzial zur Verminderung von Verlusten angesehen werden. In einem weiteren Schritt sollten daher die verschiedenen technologischen und institutionellen Möglichkeiten hinsichtlich des „praktischen“ Potenzials bewertet werden, die Materialverluste zu verringern.

¹³ Kfz: Kraftfahrzeuge

¹⁴ Bei der Verschiffung von demontierten und selektierten Schrottbestandteilen zu (europäischen) BAT-Recyclinganlagen spricht man von „best of two worlds approach BAT“. BAT bedeutet "best available techniques".

schrotten (Laufwerke, Netzteile) oder Kfz. Hierfür muss in weiteren Projekten präzisiert werden, welche Bauteile die größten Potentiale beinhalten;

- Monitoring der Altgüterströme und der rückgewonnenen Metallmengen zur Ergebniskontrolle (Effektivität und Effizienz des Recyclings);
- Monitoring der Schnittstellen der Recyclingketten zur Erhöhung der Markttransparenz, dabei Einbezug aller am Aufbereitungsprozess beteiligten Akteure (Sammlung, Behandlung, Recycling);
- Aufbau eines kontinental bis regional angepassten Angebots von produktspezifischen Behandlungs- und Recyclingprozessen, das weltweit die Effektivität der Rückgewinnung seltener und edler Metalle durch differenzierte Behandlung der Altprodukte und Zuführung zu hochtechnischen Recyclinganlagen verbessert;
- Regelmäßige Bilanzierung der Behandlungsprozesse hinsichtlich seltener Metalle mit dem Ziel der Prozessoptimierung zur Aufkonzentrierung von seltenen Metallen in Recyclingfraktionen;
- Vergleichende Analyse und Bewertung von Re-Use und Recycling im Hinblick auf Rohstoffverbrauch und Umweltbelastungen unter Beachtung regionaler und produktgruppenspezifischer Unterschiede der Recyclingsysteme;
- Klassifizierung und Zertifizierung von Recyclingtechnologien nach Kriterien der Ressourceneffizienz und der Ressourcenschonung (Minderung des Rohstoffaufwandes und der Umweltbelastungen im Vergleich zur Primärroute);
- Kooperative Governance mit dem Ziel, verbindliche Qualitätsstandards der Behandlung und des Recyclings zu erreichen, ggf. Zertifizierung der Akteure (vgl. MaRes AS2.2);
- Formulierung eines nationalen bzw. internationalen Ziels zur Verminderung des Primärrohstoffverbrauchs von Metallen unter Einbezug der zur Produktion importierter Güter über die gesamte Produktionskette hinweg eingesetzten Rohstoffe, dabei Fokus auf ausgewählte Sektoren, in denen relevante Recyclingpotentiale bestehen (z.B. die Rückgewinnung eines bestimmten Anteils des Goldes aus Elektroaltgeräten und/ oder der Einsatz einer Mindestmenge von Sekundärmetallen in der Produktion);
- Lokalisierung von Marktversagen und Erarbeiten von möglichen Rahmenbedingungen, die die Markteinführung effektiver, aktuell unrentabler Behandlungs- und Recyclingsysteme für seltene Metalle ermöglichen.

Daneben ist die geographische Komponente der Stoffflüsse seltener Metalle zu berücksichtigen: Gewinnung, Produktion, Nutzung und das Recycling von Alt- und Neuschrotten sind im Allgemeinen räumlich heterogen verteilt. Aufgrund der geringen Um-

satzmengen bei den seltenen Metallen und der hohen Investitionskosten für Hightech-Recyclinganlagen sind nur relativ wenige zentrale Recyclinganlagen rentabel. Der Rückführung der seltenen Metalle nach der letzten Nutzung in die Rückgewinnung kommt damit eine wichtige Rolle zu. Die Herausforderung besteht darin, die Abfallphase von Altprodukten – vor allem wertstoffhaltiger Elektrokleingeräte – so zu organisieren, dass sie möglichst vollständig gesammelt werden. Neben der Sammlung ist die Behandlung vor dem eigentlichen Recycling entscheidend: Hier müssen die Altprodukte so sortiert und separiert werden, dass die seltenen Metalle möglichst vollständig in Fraktionen gelangen, die dann den hochspezialisierten Recyclinganlagen zugeführt werden. Es ist also aus ressourcenpolitischer Sicht erforderlich, insbesondere die grenzüberschreitenden Metallströme effektiv und effizient zu lenken und Sammel- und Behandlungssysteme aufzubauen, die eine hinreichende Sammlung und Aufbereitung sicherstellen.

Da bei jedem Lebenszyklus der Produkte erneut Verluste auftreten, kommt neben dem Recycling der tatsächlichen Produktlebensdauer¹⁵ für die Erhöhung der systemweiten Ressourceneffizienz potenziell eine relevante Rolle zu. Häufig konkurriert jedoch die Verlängerung der Produktlebensdauer mit Fortschritten in der Energieeffizienz, Fortschritten in der Leistungsfähigkeit der Produkte oder auch dem Modeaspekt von Produkten. Zur Bewertung aktueller Entwicklungen von Produktlebensdauern hinsichtlich ihrer Auswirkung auf die Materialeffizienz wird vorgeschlagen Szenarioanalysen durchzuführen.

Die Wissensbasis zu den umweltrelevanten, seltenen Metallen konnte im Rahmen von MaRes AS2.1 wesentlich erweitert und zusammengefasst werden. Trotzdem handelt es sich um einen Zwischenstand, da noch relevante Kenntnislücken und Unsicherheiten bestehen, die durch detailliertere Stoffflussanalysen auf Basis des bisher Erreichten näher untersucht werden sollten. Die größten Kenntnislücken hinsichtlich der Materialverluste bestehen bei den Metallen Gallium und Titan. Bzgl. der Umweltbelastungen über den Lebensweg bestehen bei allen Metallen relevante Lücken.

¹⁵ Gemeint ist hier im Gegensatz zur technischen Lebensdauer der Zeitraum vom Kauf bis zum Eintritt in das Abfallsystem.

2 Weltweite Wiedergewinnung von PGM (AS2.2)

2.1 Problemstellung und Ziele des Teilprojektes

Der Einsatz von Platingruppenmetallen (PGM) mit den Hauptvertretern Platin, Palladium und Rhodium in technologieorientierten Anwendungen nimmt weltweit weiter zu. Treibende Faktoren sind die wachsende Nachfrage aus der Industrie, insbesondere aus den Anwendungsbereichen Autoabgaskatalysatoren und Elektro(nik)geräte. Mit diesen Anwendungen wächst gleichzeitig das sekundäre Rohstoffpotenzial, das nach der Nutzungsphase wieder zurück gewonnen werden könnte.

Aus ressourcen- und umweltpolitischer Perspektive kann das PGM-Recycling einen wichtigen Beitrag zur Rohstoffsicherheit, zur Ressourcenschonung und Umweltentlastung leisten.

- Stichwort Rohstoffsicherheit: da die Primärrohstoffgewinnung bei PGM auf sehr wenige Länder (vor allem Russland und Südafrika) begrenzt ist, kann mit jeder Tonne recyceltem Material die Abhängigkeit von diesen Ländern und von Preisentwicklungen in oligopolistisch strukturierten Märkten vermindert werden.
- Stichwort Ressourcenschonung: Die PGM-Vorkommen sind begrenzt. Mit Recycling können diese Vorkommen geschont werden und stehen damit auch für nachfolgenden Generationen zur Verfügung.
- Stichwort Umwelt- und Klimaschutz: das PGM-Recycling ist mit deutlich geringeren Umweltbelastungen verbunden als die primäre Rohstoffgewinnung.

Die ökonomischen und ökologischen Vorteile des PGM-Recyclings werden jedoch bisher nicht hinreichend ausgeschöpft, insbesondere da die PGM in wichtigen Anwendungsfeldern wie den Autoabgaskatalysatoren und Elektro(nik)geräten nach der Nutzungsphase in relevanten Mengen in Länder ohne angemessene Recyclinginfrastrukturen exportiert werden und somit für die globale Kreislaufführung verloren gehen. Gleichzeitig nehmen im Elektronikbereich dissipative Anwendungen zu; die geringen Mengen können mit herkömmlichen Recyclingverfahren nicht zurückgewonnen werden.

Vor dem Hintergrund dieser Ausgangslage bestand im Teilprojekt „Weltweite Wiedergewinnung von PGM“ die Aufgabe, in ausgewählten Handlungsfeldern Vorschläge zur Verbesserung des internationalen PGM-Stoffstrommanagements zu entwickeln. Hierzu wurden folgende Arbeitsschritte durchgeführt:

- Identifizierung der potenziell problematischen Exportströme und signifikanten PGM-Verluste differenziert nach unterschiedlichen Anwendungsfeldern.
- Vertiefende, akteursbezogene Untersuchung der Anwendungsfelder „Autoabgaskatalysator“ und ausgewählter „Elektro(nik)-Produkte“, Defizitanalyse bezüglich Er-

fassung, dissipativer Verluste und regulatorischer Defizite in ausgewählten Zielländern.

- Ableitung von Strategien und Maßnahmen zur Vermeidung und Substitution von PGM und zur Verbesserung der internationalen Kreislaufführung. Bewertung der vorrangig zu verfolgenden Optionen.

2.2 Ergebnisse

2.2.1 Rahmenbedingungen und Trends im PGM-Recycling

Knapp 50 Prozent der (Primär- und Sekundär-)Produktion von Platin, Palladium und Rhodium finden Verwendung in Autoabgaskatalysatoren. Weitere wichtige Anwendungsgebiete sind Elektronik, Schmuck und Prozesskatalysatoren in der Chemie und Erdölraffination.¹⁶

Die PGM-Nachfrage wird durch unterschiedliche marktliche und technische Faktoren beeinflusst. Nach den Umsatzeinbrüchen durch die Wirtschafts- und Finanzkrise 2009 hat sich im Jahre 2010 wieder ein mengenbezogenes Wachstum der Primärproduktion eingestellt, welche insbesondere durch die technologischen Anwendungsfelder getrieben wird. Eine zunehmende Bedeutung erlangen hierbei auch Anwendungsfelder wie die Photovoltaik und die Elektromobilität (vgl. Hagelüken/Buchert 2010). Der PGM Verbrauch in den verschiedenen Nachfragesektoren und deren Entwicklung in den letzten 3 Jahren ist in Tabelle 2.1 dargestellt.

Aus den dargestellten Werten ist ersichtlich, dass es während der Weltwirtschaftskrise 2009 eine deutliche Verschiebung von technologiebezogenen Anwendungen zu wertbezogenen Nutzungen gegeben hat und der Verbrauch im Krisenjahr 2009 insgesamt gesunken ist. Der Bereich Autoabgaskatalysatoren (Autokats) ist für alle drei Metalle das deutlich dominierende Anwendungsfeld. Signifikant ist hier, dass sich die Anteile zwischen Platin und dem kostengünstigeren Palladium erheblich verschoben haben.¹⁷ Im Bereich der Glasanwendungen sind bei Platin und Rhodium deutliche Wachstumschübe in der Nachfrage zu erkennen, aber auch der Verbrauch in der Chemieindustrie nach Platin und Palladium weist steigende Werte auf.

¹⁶ Siehe hierzu im Detail auch die Tabelle 2.1

¹⁷ Während in Benzinmotoren zu großen Teilen Palladium eingesetzt wird, kommt bei Diesel-Fahrzeugen bisher hauptsächlich das wesentlich teurere Platin zum Einsatz, das auch bei den niedrigeren Betriebstemperaturen effektiv wirkt (vgl. Brenscheidt 2001, 24).

Tab. 2.1: Entwicklung des globalen Verbrauchs von Platin, Palladium und Rhodium bezogen auf unterschiedliche Anwendungsfelder (2008-2010) in Tonnen

<i>Platin</i>	2008	2009	2010	<i>Palladium</i>	2008	2009	2010	<i>Rhodium</i>	2008	2009	2010
Autokats	103,6	61,9	84,6	Autokats	126,5	114,8	146	Autokats	21,7	17,5	20,6
Elektro	6,5	5,3	6,3	Elektro	38,8	36,0	39,8	Elektro	0,08	0,08	0,1
Invest	15,7	18,7	12,3	Invest	11,9	17,7	18,9				
Schmuck	58,4	79,6	68,6	Schmuck	27,9	21,9	17,8				
Glas	8,9	0,2	10,3					Glas	0,9	0,5	1,6
Medizin	6,9	7,0	7,2	Dental	17,7	18,0	17,5				
Chemie	11,3	8,2	12,7	Chemie	9,9	9,2	10,9	Chemie	1,9	1,5	1,8
Andere	15,0	11,3	12,0	Andere	2,1	1,9	2,2	Andere	0,6	0,5	0,5
Verbrauch	226,5	192,6	214,3	Verbrauch	235,0	219,7	253,4	Verbrauch	25,4	20,2	24,8
Recycling	51,8	39,8	52,1	Recycling	45,7	40,5	52,3	Recycling	6,4	5,3	6,7
Net.-Verbr.	174,6	152,8	162,1	Net.-Verbr.	189,2	179,1	201,1	Net.-Verbr.	18,9	14,9	18,0
Lager	6,2	18,0	8,2	Lager	18,0	22,1	1,2	Lager			

Quelle: Eigene Zusammenstellung und Berechnung in t auf der Basis der Angaben in Johnson Matthey 2010. Die Werte für 2010 sind Schätzwerte auf der Basis der ersten 9 Monate, Wachstumswerte in fett.

Das Recycling hat zunehmend strategische Bedeutung für die Rohstoffsicherung, da es erhebliche Probleme bei der Ausdehnung der Primärproduktion gibt, die in Russland an die Nickelproduktion gekoppelt ist und in Südafrika immer wieder durch die mangelnde Energieversorgung beeinträchtigt wird.

Trotz dieser Engpässe gibt es immer noch große Unterschiede bei der Kreislaufführung der PGM. Im Bereich industrieller Anwendungen, z.B. Industriekatalysatoren, werden Recyclingraten bis zu 90 % erreicht (vgl. Saurat/ Bringezu 2008 u. 2008a). Demgegenüber sind die Recyclingquoten im Bereich der Konsumgüter deutlich schlechter. Beispielsweise beträgt der Beitrag des Recyclings zur Versorgung mit Palladium bei Autoabgaskatalysatoren 2010 26 % (2006 waren es 20 %). Im Bereich der elektronischen Anwendungen stieg die Quote ebenfalls von 19 % im Jahr 2006 auf 31 % im Jahr 2010 (nach JM 2010, S. 36). In der Summe können die Recyclingwerte 2010 voraussichtlich deutlich verbessert werden, was (JM 2010) darauf zurückführt, dass in den Industriestaaten zunehmend effektivere Recyclingsysteme eingeführt werden¹⁸. Hinsichtlich der Werte in 2010 ist aber auch zu beachten, dass aufgrund des Preisverfalls 2009 viel sekundäres Material gelagert wurde, welches dann zeitverschieben erst 2010 die Refiner erreicht hat. Ob sich diese hohen Werte stabilisieren werden, ist daher fraglich.

¹⁸ Allerdings muss beachtet werden, dass JM 2010 diese Recyclingquoten als Anteil am jeweiligen Produktionsinput der Weltregionen ermittelt und dies nichts mit einer abfallbezogenen Recyclingquote zu tun hat.

Ein wichtiger Trend ist die zunehmende Internationalisierung der PGM-Stoffströme. Ein steigender Teil der produktbezogenen Quellen für das Recycling verlagert sich in die neuen Wachstumsökonomien der großen Schwellenländer. Entsprechend versuchen die internationalen Metallkonzerne Sammelstrukturen aufzubauen, um ihre „Integrated Smelters“¹⁹ mit Input zu versorgen. Diese Aktivitäten finden vielfach außerhalb des Abfallregimes statt und sind von Land zu Land sehr unterschiedlich.

Über den Export von gebrauchten (und auch neuen) Konsumgütern wie Kraftfahrzeugen und Elektrogeräten aus Deutschland bzw. aus der EU werden signifikante PGM-Mengen in Drittländer verlagert, die über keine adäquate Recyclinginfrastruktur verfügen (Russland, Mittelasien, Südostasien, Naher Osten, Westafrika). Dieser Problematik wurde im Rahmen der Projektbearbeitung der Bereiche „Autokatalysatoren“ (siehe Abschnitt 2.2.2) und „Elektronikgüter“ (siehe Abschnitt 2.2.3) besondere Beachtung geschenkt.

2.2.2 Untersuchungsschwerpunkt „PGM-Rückgewinnung aus Autoabgaskatalysatoren“

Im Jahr 2008 wurden nur ca. 15 % der ca. 3 Millionen endgültig stillgelegten Fahrzeugen in Deutschland verwertet, 8 % gingen als Gebrauchtwagen direkt in Nicht-EU-Staaten²⁰, 50 % wurden als Gebrauchtwagen in EU-Staaten und zwar überwiegend in die neuen EU-Beitrittsländer exportiert (BMU/UBA 2010), von wo ein Teil für eine weitere Nutzungsphase nochmals ins Nicht-EU-Ausland gelangt. Für 23% ist der weitere Verbleib statistisch nicht belegt. Der Stand der statistischen erfassbaren Ausfuhren ist in der Abbildung 2.1 dargestellt.

Aus den verschiedenen statistischen Quellen ist keine verlässliche Abschätzung der PGM-Verluste möglich. Die Erfassung im Rahmen der Außenhandelsstatistik ist vor allem im innereuropäischen Handel aufgrund der umsatzbezogenen Meldeschwellen unvollständig, die Erfassungskriterien sind in den einzelnen Mitgliedstaaten unterschiedlich, insgesamt können Exportketten über mehrere EU-Länder nicht nachvollzogen werden. Vor diesem Hintergrund ist zu begrüßen, dass die EU-Kommission und Eurostat eine Anleitung zur Vereinheitlichung und Verbesserung der Datenbasis veröffentlicht haben (Europäische Kommission 2010).

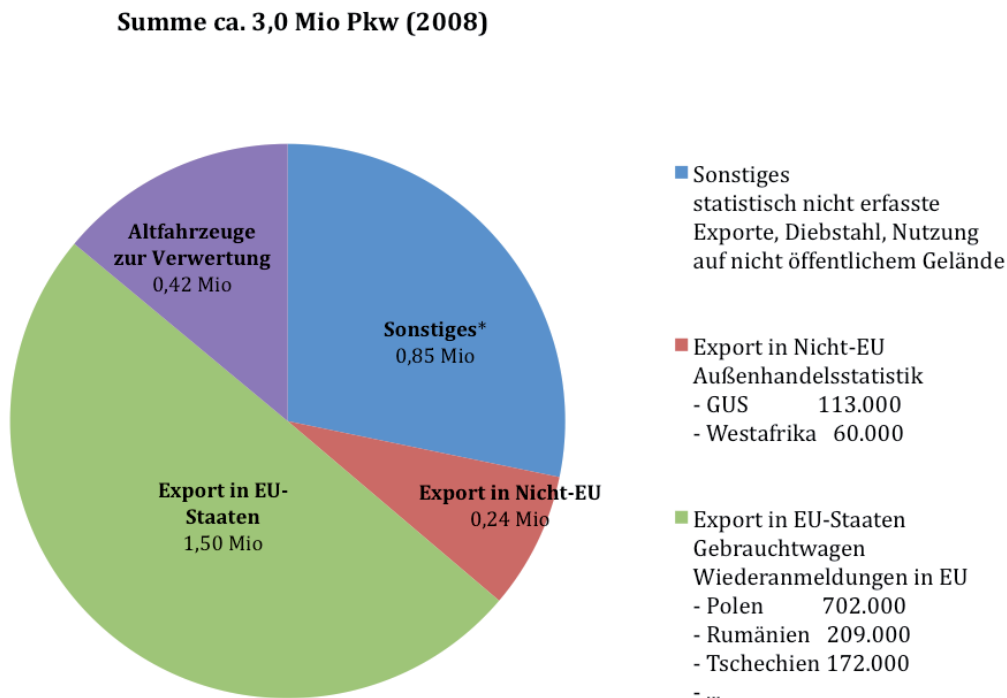
Aufgrund der geführten Expertengespräche und der Länderstudien ist erkennbar, dass die Exporte in die GUS-Staaten vor allem nach Mittelasien (z.B. Kasachstan) an Bedeutung gewinnen. Damit erweitert sich der Kreis derjenigen Länder, in denen der Fahrzeugbestand schnell wächst, die aber gleichzeitig über keine effektive Recyclinginfrastruktur und keine Kontrollen hinsichtlich des Fahrzeugzustandes verfügen. Wie

¹⁹ Integrated Smelters betreiben ein Multimetall-Recycling. Sie sind in der Lage unterschiedliche Eingangsstoffe zu verarbeiten, Schadstoffe und organische Stoffe abzutrennen und in der eigentlichen Metallschmelze viele verschiedene Metalle zurückzugewinnen

²⁰ Von diesen 8% beträgt der Anteil von Ländern mit guter Recyclinginfrastruktur (Norwegen, Schweiz, USA, Japan etc.) laut Außenhandelsstatistik etwa 10 %.

die durchgeführten Länderstudien zeigen, ist für die weitere Entwicklung der PGM-Potenziale die Entwicklung der Fahrzeugbestände und deren Ausrüstung mit Abgaskatalysatoren entscheidend.

Abb. 2.1: Verbleib der in Deutschland endgültig stillgelegten Fahrzeuge im Jahr 2008



Quelle: BMU/UBA 2010 nach Angaben des Kraftfahrtbundesamtes (Außerbetriebsetzungen, Wiederanmeldungen) und des Statistischen Bundesamtes (Abfallstatistik, Außenhandelsstatistik)

Insbesondere in Osteuropa wie z.B. den russischen Stadtregionen (Moskau, St. Petersburg) wird in den nächsten Jahren die Mehrheit der Fahrzeuge mit geregelter 3-Wege-Katalysatoren ausgerüstet sein. Für diese Fahrzeuge ergibt sich aufgrund der langen Betriebsdauer und der schlechten Wartung in Kombination mit oft schlechten Straßenverhältnissen ein erhebliches Austrittsrisiko von PGM in die Umwelt aus beschädigten Katalysatoren. Wo in den Zielländern außerhalb der EU doch punktuell eine Katalysator-Demontage erfolgt, führt dies zu nicht nachvollziehbaren Handelsströmen mit den Materialien im Rahmen so genannter Grauer Märkte.

Um die dargestellten Probleme zu bewältigen, wurde im Rahmen des Projektes für die industriellen und staatlichen Akteure eine Roadmap entwickelt und mit ihnen auf einem Workshop in Berlin diskutiert (Lucas/Wilts 2009). Grundsätzlich wurden die hierin vorgeschlagenen Maßnahmenfelder durch die Workshop-Teilnehmer als geeignet angesehen, um das PGM-Recycling bezüglich der Autoabgaskatalysatoren zu verbessern:

- Eine Vereinbarung/Commitment zwischen den Akteuren in der Wertschöpfungskette „Katalysator-Recycling“ über Qualitäts- und Umweltstandards in der Redistributions-Logistik und den Verfahren zur Katalysator-Entmantelung und PGM-Rückgewinnung.
- Selbstverpflichtung der Fahrzeug- und Katalysator-Hersteller auf Mindestsammel- u. Recyclingquoten für PGM sowie Quoten für den Einsatz von Sekundär-PGM.
- Aufbau von Redistributionssystemen in den Zielmärkten der 2. und 3. Fahrzeugnutzung durch die Industriepartner (Automobilindustrie/Katalysatorhersteller) im Rahmen ihrer Produktverantwortung zwecks Behandlung in integrierten und hierfür spezialisierten Hüttenwerken.
- Kennzeichnung der Katalysatoren z.B. durch Einsatz der RFID-Technologie zur Unterstützung der Redistribution und, um die Exportströme und den letztendlichen Verbleib der Katalysatoren nachvollziehen zu können, Verbesserung der statistischen Erfassung durch präzisere Deklarationspflichten für den Handel mit gebrauchten Fahrzeugen.

Für diese Maßnahmen ergibt sich ein Zeitfenster von ca. 10 - 15 Jahren, da erst zu diesem Zeitpunkt ein hoher Anteil an Fahrzeugen zur Entsorgung ansteht, der über eine Autoabgasregelung verfügt (je nach Zielland zu differenzieren).

2.2.3 Untersuchungsschwerpunkt „PGM-Rückgewinnung aus Elektro- und Elektronikgeräten“

Das Aufkommen an Elektroaltgeräten wächst in der EU schneller als alle anderen Abfallfraktionen aus Haushalten (vgl. UNU 2008, 3). Technisch sind beim Recycling von Leiterplatten, die den Großteil des eingesetzten Palladiums enthalten, Rückgewinnungsquoten von bis zu 95% erreichbar, die wesentlichen Defizite liegen in der Erfassung einerseits und in der Behandlung und Aufbereitung andererseits.

Ein wesentliches Problem ist darin zu sehen, dass relevante Mengen an gebrauchten Elektrogeräten den europäischen Wirtschaftsraum verlassen. Nach (Sander/ Schilling 2010) wurden im Jahr 2008 ca. 155.000 t gebrauchte Elektrogeräte und Elektroaltgeräte aus Deutschland exportiert, davon alleine etwa ca. 2 Mio. Monitore. Global muss man davon ausgehen, dass davon nur etwa 10% überhaupt einem Recycling zugeführt werden (vgl. LaDou et al. 2007 und UNEP 2010). Unter der Annahme international bindender Verpflichtungen zu hochwertigen Recyclingstandards könnte mittelfristig jedoch durchaus ein internationaler Markt für Langlebigkeit (Re-use) aufgebaut werden.²¹

²¹ Vgl. die OECD Arbeiten zum Sustainable Materials Management und den Arbeiten zu Rahmenbedingungen der Ressourcenpolitik im Projekt MaRes, insbesondere ‚Internationaler Metall-Covenant‘ und ‚Ressourcenzertifizierung (RIZL)‘.

Die vertiefend untersuchten Produktbereiche Monitore und Mobiltelefone, die beide Palladium enthalten, zeichnen sich durch unterschiedliche Ausgangslagen aus: Während Mobiltelefone in der Regel legal als funktionsfähige Gebrauchtgeräte mit einem positiven Marktwert exportiert werden, handelt es sich bei alten Bildschirmen (vor allem CRT-Monitoren) häufig um illegale Exporte, bei denen die Exportkosten unter den Entsorgungskosten in Deutschland liegen.

Aber auch im Inland ergeben sich Defizite in der Kreislaufführung, wenn Geräte nicht über die davor vorgesehen Systeme erfasst und anschließend einem hochwertigen Recycling zugeführt werden. Für beide Bereiche Mobiltelefone und Monitore zusammen wurde für Deutschland beim gegebenen Stand der Technik ein zusätzliches theoretisches Recyclingpotenzial von ca. 0,75 t PGM berechnet, was die gesamte europäische Nettonachfrage für den Elektronikbereich übertreffen würde (vgl. JM 2010).

Die auf Basis dieser Analyse entwickelten Maßnahmenvorschläge setzen auf unterschiedlichen räumlichen Ebenen an und zielen auf eine verbesserte Koordination von bereits bestehenden Einzelinitiativen im Bereich gebrauchter Elektronikgeräte und Elektroaltgeräte. Grundsätzlicher Ansatz ist eine Stärkung der Herstellerverantwortung für die Nachnutzungsphase seiner Produkte, wie sie auch im ElektroG vorgesehen ist, bisher aber durch legale und illegale Exporte unterlaufen wird (vgl. Wilts 2009). Im Einzelnen sollten folgende Maßnahmen vorrangig verfolgt werden:

- Ansätze zum Technologie- und Wissenstransfer sollten in solche Entwicklungs- und Schwellenländer ausgeweitet werden, in denen die Nutzungsphase von Elektro- u. Elektronikgeräten endet (sowohl von importierten als auch aus Eigenproduktion). Diese Länder zeichnen sich meist durch sehr hohe Sammelintensität aus, es fehlt jedoch vollständig an der notwendigen Recyclinginfrastruktur (vgl. Yu et al. 2010). Hier lassen sich erhebliche Win-Win-Potenziale erschließen, wenn die Edelmetalle z.B. auf den demontierten Leiterplatten anschließend den international vernetzten Smeltern zugeführt werden anstatt im gesundheits- und umweltgefährdenden „Hinterhofrecycling“ zu landen. – Die erzielbaren Erträge übersteigen deutlich die Transportkosten (vgl. Hagelüken 2010).
- Für den Bereich Mobiltelefone besteht die Notwendigkeit, die Erfassungsquote im Inland deutlich zu steigern. Vorbilder für optimierte Erfassungssysteme z.B. mit ausgewiesenen Recyclinggebühren in Kombination mit einer intensiven Öffentlichkeitsarbeit (nationaler Aktionstag, Unterrichtsmaterialien etc.) existieren z.B. in der Schweiz (vgl. SWICO 2009). Einen zusätzlichen Anreiz könnten Pfandsysteme für Handys darstellen (vgl. MPPI 2009).
- Bei Monitoren ist der illegale Export von Altgeräten durch produktspezifische Festlegungen zur Gebrauchstauglichkeit für die Abgrenzung von Alt- und Gebrauchtgeräten einzudämmen. Darüber hinaus sollten die Geräte im Rahmen der Sperrmüllabfuhr nicht länger vom Straßenrand eingesammelt werden, sondern durch direkte Abholung von Elektro- und Elektronikschrott aus den Haushalten, um die Berau-

bung von Wertstoffen und Beschädigungen zu vermeiden (Sander/Schilling 2010). Die Transparenz und Sicherheit wird insgesamt erhöht.

2.3 Übergreifende Aspekte eines internationalen Governance-Ansatzes zur Steuerung der Stoffströme im PGM-Recycling

Die durchgeführten Untersuchungen in beiden Handlungsfeldern haben ergeben, dass das internationale PGM-Stoffstrommanagement von der internationalen Marktentwicklung geprägt ist und der Einfluss nationaler Abfallregimes auf das Stoffstrommanagement sehr begrenzt ist. Auf der internationalen Ebene sind verbindliche zwischenstaatliche Regelungen im Rahmen des WTO-Regimes (freier Welthandel) nicht in Sicht. Vor diesem Hintergrund wird vorgeschlagen, einen kooperativen Governance-Ansatz zu verfolgen, der in den Wertschöpfungsketten des PGM-Recyclings zu verbindlichen Qualitätsstandards führt. Eine führende Rolle bei der Durchsetzung solcher Standards können die international tätigen Metallkonzerne wie Umicore und Johnson Matthey übernehmen, da sie direkt von einer solchen Qualitätssteigerung profitieren würden.

Derartige kooperative Strukturen können bilateral oder multilateral von den Regierungen in der EU und den ihnen nachgeordneten Umweltbehörden unterstützt und gefördert werden. Auch UNEP – die mit ihrem Resource-Panel in diesem Bereich bereits aktiv ist - könnte eine wichtige koordinierende Rolle übernehmen, um z.B. den Erfahrungsaustausch beim Aufbau von effektiven Recyclingsystemen zu verbessern (vgl. UNEP 2010). Entscheidend wird jedoch sein, ob die in Europa führenden Raffinationsbetriebe und deren Kunden aus der Automobilindustrie und der Elektroindustrie sich aktiv beteiligen.

Staatliche Stellen können insgesamt dazu beitragen, den Informationsfluss in den sekundären PGM-Ketten zu verbessern, indem Berichtspflichten vor allem des Handels eingefordert werden. Des Weiteren sollten die anzustrebenden Recycling-Standards (Beste Verfügbare Technik) in Rechtsvorschriften (Altfahrzeugverordnung, Elektrogesetz) Eingang finden. Ein weiterer Ansatzpunkt für staatliches Handeln ist das bestehende Technologie- und Qualifizierungsgefälle zwischen den OECD-Staaten und den Zielländern gebrauchter PGM-haltiger Konsumgüter.

Geeignetes Instrument hierfür wäre der Aufbau eines spezifischen Technologietransfer- und Beratungsprogramms, um in den Zielländern eine geordnete Sammlung, qualitativ hochwertige PGM-Redistribution und Vorbehandlung zu initiieren (zugeschnitten vor allem auf die EU-Beitrittsländer und ausgewählte CEEC-Staaten). Eine Veränderung der Redistributionswege durch den Aufbau neuer Metallschmelzen in den Zielländern ist derzeit nicht in Sicht, insofern ist es wahrscheinlich, dass es unter der Bedingung des freien Welthandels die gegenwärtigen Rückführungsstrukturen zu den Metallschmelzen weiter ausgebaut werden.

3 Materialbestand und Materialflüsse in Infrastrukturen (AS2.3)

3.1 Problemstellung und Ziele des Teilprojektes

Infrastruktursysteme können mit erheblichen Umweltbelastungen durch den Ressourcenaufwand für die Errichtung und Unterhaltung sowie die Entsorgung der entstehenden Abfälle verbunden sein. Auch vor dem Hintergrund steigender Rohstoffpreise und einer zunehmenden Versorgungsunsicherheit sollte es Ziel eines nachhaltigen Ressourcenmanagements sein, den Verbrauch an Primärrohstoffen absolut zu verringern und den Anteil an Sekundärrohstoffen zu erhöhen.

Um hierfür die nötigen Basisinformationen bereit zu stellen, wurden in AS2.3 des MaRess-Projektes relevante netzgebundene Infrastrukturen in Deutschland hinsichtlich ihres jährlichen Materialbedarfs für Instandhaltung und Neubau, sowie ihrer gespeicherten Materialien (Stoffdepots) analysiert. Dabei wurden vier Infrastrukturtypen betrachtet:

- Verkehrsnetze,
- Trink- / Abwassernetze,
- Telekommunikations- und IT-Kommunikations-Netze,²²
- Elektrizitäts-, Gas- und Fernwärmenetze.

Die Errichtung und Erhaltung von Infrastruktursystemen sind mit erheblichen Stoffströmen verbunden. Eine Analyse der in Infrastrukturen gebundenen Materialspeicher und jährlich anfallenden Materialflüsse liefert die Datenbasis, mit deren Hilfe gezielt Ansätze zur Ressourcenschonung abgeleitet und diskutiert werden können. Zudem liefert dieses AP Informationen, welche Materialien in welcher Menge bei einem Rückbau dieser Infrastrukturen potenziell als Recyclingmaterial zur Verfügung stehen würden („urban mining“). Die in MaRess AP 2.3 ermittelten Daten können zudem dafür genutzt werden, die stoffliche Dimension bestimmter energetischer Ausbauziele (z.B. DENA-Netzstudien im Stromsektor) abzuschätzen.

Folgende Arbeitsschritte wurden durchgeführt:

- Phase I: Identifizierung relevanter Infrastrukturbereiche / Referenz-Systeme;
- Phase II: Bestimmung der aktuellen Bestandsgrößen und des Materialspeichers der Referenzsysteme;
- Phase III: Bestimmung der jährlichen Materialflüsse der Referenzsysteme;

²² Im folgenden wird hierfür die übliche Abkürzung IuK d.h. Information und Kommunikation verwendet.

- Phase IV: Entwicklung von ersten Handlungsempfehlungen und Formulierung weiteren Forschungsbedarfes.

Sowohl die Bestands- als auch die Flussgrößen wurden bis auf wenige Ausnahmen mittels eines bottom-up-Ansatzes erfasst, bei dem die Länge bzw. die Anzahl der einzelnen Referenzsysteme mit spezifischen Materialkoeffizienten verknüpft und auf den Gesamtbestand bzw. auf die jährliche Erweiterung / Erneuerung hochgerechnet wurden. Soweit möglich wurden die anfallenden Materialmengen durch Abbruch von Infrastrukturbestandteilen in gleicher Weise ermittelt. Die spezifischen Materialkoeffizienten stammen zum einen aus der Auswertung relevanter Datenbanken und Literatur (Ecoinvent; diverse Ökobilanzierungen und Lebenszyklusanalysen), und wurden zum anderen durch umfangreiche eigene Recherchen ergänzt. So wurden Herstellerangaben für bestimmte Infrastrukturkomponenten verwendet oder entsprechende Experten in Forschungseinrichtungen, Herstellerfirmen und Netzbetreibern befragt. Für die systematische Erfassung von Inputs, Outputs und Beständen von Infrastrukturen nach Materialien wurde die Methode der Materialflussanalyse (MFA) genutzt und mit Hilfe von Flussdiagrammen grafisch dargestellt. Zur verbesserten Abschätzung der ökologischen Relevanz der einzelnen Referenzsysteme wurden die Bestands- und Flussgrößen zusätzlich mit ihren ökologischen Rucksäcken, d.h. den mit ihrer Herstellung verbundenen vorgelagerten Ressourcenaufwendungen (Primärmaterial, einschließlich genutzter und ungenutzter Extraktion) ausgewiesen.

3.2 Zusammenfassung der Ergebnisse

3.2.1 Verkehrsinfrastruktur

Im Bereich der Verkehrsinfrastruktur wurden sowohl die Straßeninfrastruktur, als auch die Schieneninfrastruktur und die Binnenwasserstraßen analysiert. Die Ingenieurbauwerke (Brücken und Tunnel) der Schieneninfrastruktur und der Bundesautobahnen waren ebenfalls Teil der Erfassung der gespeicherten Materialbestände sowie der jährlichen Materialflüsse im Bereich der Verkehrsinfrastrukturen.

Die Materialbestände der deutschen Straßeninfrastruktur (über 7,3 Mrd. Tonnen) wurden über technische Straßenbaunormen, die den Aufbau verschiedener Straßenkategorien festlegen, für einen Quadratmeter Referenzstraße ermittelt und diese Werte auf der Basis von Referenzquerschnitten dann auf die bestehende Länge des deutschen Straßennetzes hochgerechnet. Die jährlichen Erneuerungsbedarfe wurden über die Nutzungs- bzw. Lebensdauer hochgerechnet.²³ Die hier erfassten Materialmengen ergeben sich aus der Betrachtung der Straßenflächen sowie der Ingenieurbauwerke an Bundesautobahnen. Andere Bereiche, die ebenfalls der Straßeninfrastruktur zuge-

²³ Soweit keine detaillierten Informationen vorlagen, wurde auch in den anderen Infrastrukturbereichen der Erneuerungsbedarf über die Lebensdauer ermittelt.

rechnet werden können, wie Fuß- und Radwege, Lärmschutzwände oder Schutzplanen waren nicht Teil der Analyse.

Der Materialbestand im Bereich der Schieneninfrastruktur (1,15 Mrd. Tonnen) konnte im Verlauf des Projektes dank der umfangreichen Daten eines parallel durchgeführten UBA-Projektes (Schmied/Mottschall 2010) in großer Detailtiefe ermittelt werden. Die Hochschätzung der gespeicherten Materialmengen in der Wasserstraßeninfrastruktur (über 200 Mio. Tonnen), einschließlich Binnenhafenanlagen, basiert im wesentlichen auf früheren Untersuchungen von Stiller (1995) und Manstein/Stiller (2000), welche am Wuppertal Institut durchgeführt wurden.

Die gespeicherte Menge an mineralischen Rohstoffen in der Straßeninfrastruktur übersteigt die der anderen Infrastruktursysteme um das Mehrfache. Zudem sind die jährlichen Stoffflüsse im Bereich der Verkehrsinfrastrukturen - im Gegensatz zu den anderen Infrastruktursystemen - vor allem durch die Instandhaltung der Infrastruktur bestimmt. So ist der jährliche Materialbedarf für die Instandhaltung im Straßenbau (104 Mio. Tonnen) fünfmal höher als der des Neu- und Ausbaus (21 Mio. Tonnen). Dabei sind Gemeindestraßen sowohl beim Neubau als auch bei der Instandsetzung in absoluten Größen auf Grund der Länge des Straßennetzes der größte Verursacher von Stoffflüssen²⁴. Auch im Schienennetz geht der Großteil der jährlichen Stoffströme in die Instandhaltung der Strecken. Eine Erweiterung findet dort nur noch in geringem Maße statt.

Die Datensituation lässt eine belastbare Analyse der Materialströme zur Instandhaltung von Wasserstraßen nicht zu. Daher konnte nur der Materialbestand für den Neu- und Ausbau abgeschätzt werden²⁵.

3.2.2 Wasser- und Abwasserinfrastruktur

Im Bereich der Wasser- und Abwasserinfrastruktur wurden auf der Basis einer Relevanzanalyse die folgenden Referenzsysteme identifiziert und untersucht:

- Infrastrukturen der Wasserversorgung:
Talsperren, Wasserwerke, Wasserspeicher, Leitungsnetz
- Infrastrukturen der Abwasserentsorgung:
Kanalnetz, Schächte, Regenentlastung, Kläranlagen

Zum Teil konnte für die Untersuchung auf bestehende Materialkoeffizienten aus anderen Untersuchungen zurückgegriffen werden, welche teilweise im Hinblick auf die deutschen Verhältnisse modifiziert wurden. Ergänzt wurden diese Daten um umfangreiche Recherchen in technischen Regelwerken, Produkthandbüchern, Fachliteratur

²⁴ Pro km sind Autobahnen der ressourcenintensivste Straßentyp.

²⁵ Die Instandsetzung von z. B. Schleusen ist allerdings nur schwierig von einem Ausbau zu unterscheiden. Häufig wird bei einer Instandsetzung die Schleuse erweitert und ausgebaut.

und Expertengesprächen. Damit konnte insgesamt in den meisten Fällen eine belastbare Datengrundlage geschaffen werden. Jedoch hat sich im Projektverlauf insbesondere im Bereich der jährlichen Flüsse gezeigt, dass eine Verbesserung der Datenbasis notwendig ist.

Bezüglich der in der Wasser- und Abwasserinfrastruktur gebundenen Materialien ist auch hier die herausragende Bedeutung der mineralischen Baustoffe hervorzuheben, welche knapp 99% der insgesamt knapp 1,8 Mrd. Tonnen Baustoffe ausmachen. Dies liegt vorwiegend an der Rohrbettung der Leitungsnetze. Auch Beton (und hier vorwiegend Stahlbeton) spielt mit knapp 500 Mio. Tonnen bei der Konstruktion vieler Anlagen der Wasser- und Abwasserinfrastruktur eine große Rolle. Im Gegensatz dazu spielen Metalle (rund 20 Mio. Tonnen, davon überwiegend Stahl und Eisen) und Kunststoffe (< 2 Mio. Tonnen) nur eine untergeordnete Rolle. Als Hauptwerkstoffe im Leitungsbau sind sie zudem meist unterirdisch verbaut und damit schlecht zugänglich.

Die Veränderung des aktuellen Materialbestandes resultiert im wesentlichen aus Neubau- / bzw. Rückbauaktivitäten und zu einem geringeren Maße aus unterschiedlichen Sanierungsverfahren.²⁶ Angesichts der lückenhaften Datengrundlagen sind die ermittelten jährlichen Materialflüsse mit etwa 1% des Gesamtmaterialbestandes wahrscheinlich unterschätzt. Dies gilt insbesondere für durch Instandhaltung induzierte Materialflüsse. Durch den Einsatz neuer Materialien (verstärkte Verwendung von Kunststoff) liegt der Materialinput bei Erneuerungs-Aktivitäten im Kanal- und Leitungsnetz sogar unter dem Material-Output. Bei der Interpretation der Ergebnisse ist zu berücksichtigen, dass eine Annäherung an tatsächliche Erneuerungsraten (statt erforderlicher Erneuerungsraten) die Grundlage für die Berechnungen stellt. Gerade im Bereich der Wasser- und Abwasserinfrastruktur wird der Investitionsbedarf in die Instandhaltung als sehr hoch eingeschätzt, was steigende jährliche Materialflüsse nach sich ziehen würde. Die Angaben über den Investitionsbedarf schwanken allerdings stark. Während Kluge et al. (2003) von 150 bis 250 Mrd. Euro sprechen, kommen Reidenbach et al. (2008) nur auf einen kommunalen Investitionsbedarf von 65 Mrd. Euro für Ersatzinvestitionen im Wasser- und Abwasserbereich.

3.2.3 Energieinfrastruktur (Elektrizität, Gas, Wärme)

Die untersuchten Energieinfrastrukturen lassen sich in Energieerzeugungs- und Energieverteilungssysteme differenzieren. Im Rahmen von MaRes wurden neun verschiedene Arten der Stromerzeugung untersucht.²⁷ Nicht untersucht wurden zum einen Anlagen mit geringer Bedeutung für die deutsche Energieversorgung (z.B. geothermische Stromerzeugung) bzw. Energieerzeugungsarten, die häufig zunächst zur Eigenversor-

²⁶ In der Sanierung unterscheiden wir Reparatur, Instandhaltung und Erneuerung.

²⁷ Dies sind konventionelle Kraftwerke (Stein- und Braunkohle), Gaskraftwerke, Kernkraftwerke, und im Bereich der erneuerbaren Energiequellen Wasserkraft- und Windenergieanlagen (on-shore) sowie Biogasanlagen. Zusätzlich wurden noch Heizkraftwerke und Blockheizkraftwerke abgeschätzt.

gung dienen (Photovoltaik). Im Bereich der Energieverteilungsinfrastruktur wurden die Daten für die Strom-, Gas- und Wärmenetze erfasst.

Die Materiallager der Energieverteilungsnetze (650 Mio. Tonnen) sind - bedingt durch die Sandbettung der Stromkabel und der Gas- und Fernwärmerohre - deutlich materialintensiver als die Erzeugungsinfrastruktur (88 Mio. Tonnen). Ohne den verbauten Sand (585 Mio. Tonnen) sind allerdings im Bestand der Energieerzeugungsinfrastrukturen höhere Mengen an Rohstoffen gespeichert. Wie auch im Bereich der Wasser- und Abwasserinfrastruktur bestimmen neben Sand vor allem Beton (94 Mio. Tonnen) und Stahl (37 Mio. Tonnen) die Materialbestände der Energieinfrastrukturen.

Konventionelle Kraftwerke sind in ihrer Mehrzahl am Ende ihrer Lebensdauer angelangt und müssen entweder ausgetauscht oder durch andere Energieerzeugungssysteme ersetzt werden – z.B. dezentral auf Grundlage erneuerbarer Energiequellen. Damit sind relevante Ressourcenaufwendungen verbunden. Unsere Analysen zeigen, dass auch dezentrale Einrichtungen mit hohen Stoffströmen für die Erstellung der Anlagen verbunden sind. Allerdings wird dies bspw. bei Windenergieanlagen in der Nutzungsphase mehr als kompensiert, da bis auf notwendige Instandsetzungen nur geringe Stoffströme induziert werden und pro kWh erzeugter Energie deutlich weniger Ressourcen beansprucht werden als bei fossilen Kraftwerken.

Mit dem Ausbau dezentraler Energieerzeugungsanlagen und einer regionalen Verschiebung des Angebots (Offshore Windenergie im Norden Deutschlands) muss mit verstärkten Investitionen für den Leitungsbau auf allen Spannungsebenen gerechnet werden. Insgesamt sind die jährlichen Materialströme im Bereich der Energienetze und der regenerativen Energieerzeugungseinrichtungen noch deutlich mehr durch Ausbau und Erweiterung als durch Erneuerung und Instandhaltung geprägt.

3.2.4 Telekommunikationsinfrastruktur

Das ursprüngliche Projektziel, die Telekommunikationsinfrastruktur sowohl für Festnetz als auch für Mobilfunk zu erfassen, konnte nicht umgesetzt werden, da keine frei zugänglichen Daten in ausreichender Qualität zum Ausbau des Festnetzes zu ermitteln waren. Firmendaten oder Daten der Bundesnetzagentur konnten aus Gründen der Wahrung von Geschäftsgeheimnissen bzw. Vertraulichkeitsverpflichtungen nicht genutzt werden. Als ein erster Schritt wurden im MaRes AP 2.3 deshalb zunächst Materialbestand und -flüsse des Mobilfunknetzes (GSM und UMTS) abgeschätzt. Für den Mobilfunkbereich lagen Informationen von Netzbetreibern und auch Sachbilanzen aus Lebenszyklusanalysen vor. Die Daten der unterschiedlichen Quellen waren jedoch nicht konsistent, so dass mit oberen und unteren Grenzwerten gearbeitet wurde. Wie in anderen Studien, die sich mit der stofflichen Dimension von IuK-Anwendungen beschäftigen (z.B. Borderstep-Studie im Auftrag des UBA zum Materialbestand von Rechenzentren), stößt die Aufteilung der einzelnen IuK-Komponenten des Mobilfunknetzes in unterschiedlichen Stoffkategorien aufgrund unzureichend differenzierter Daten

jedoch an Grenzen. Komplexere Bauteile können deshalb meist nur mit ihrem Eigengewicht, aber nicht mehr unterteilt nach verschiedenen Stoffgruppen erfasst werden. Die Dynamik der Entwicklung der Netztechnik führt zudem dazu, dass LCA-Studien schon nach zwei Jahren veraltet sind. Als wesentliches Ergebnis ist festzuhalten, dass die gespeicherten Mengen an Materialien (schätzungsweise 137.000 Tonnen) wie auch die jährlichen Stoffflüsse (schätzungsweise 17.000 Tonnen) im Bereich der Mobilfunkinfrastruktur sind im Vergleich zu den anderen drei Infrastruktursystemen unbedeutend sind. Eine Erfassung der Materialbestände im Bereich Festnetz würde die Bedeutung der luK-Infrastruktur für den Materialbestand der deutschen netzgebundenen Infrastruktur deutlich erhöhen (Sandbettung der Kupferkabel), zumal die vorhandene luK-Infrastruktur durch den zukünftig zu erwartenden Netzbau auf Glasfaserkabel bis zu den Kabelverzweigern ein großes Wiederverwertungspotential für Kupferkabel aufweist.

3.3 Handlungsempfehlungen zur Reduzierung der jährlichen Materialströme für leitungsgebundene Infrastrukturen und weiterer Forschungsbedarf

Ein zunehmendes Materiallager in Infrastrukturen hat generell wachsende stoffliche und finanzielle Aufwendungen für die Instandhaltung und Erneuerung zur Folge. Deshalb sollte ein weiterer Aus- und Neubau grundsätzlich hinterfragt werden. Eine Begrenzung des Umfangs der Infrastruktursysteme ist eine notwendige Voraussetzung, sowohl stetig wachsende Unterhaltungskosten in den Griff zu bekommen, als auch zunehmenden Verbrauch natürlicher Ressourcen zu begrenzen.

Im Straßenbau könnte eine Überprüfung der Baunormen in Zusammenarbeit mit Straßenbauingenieuren und anderen Experten (z.B. Straßensicherheit) enorme Einsparpotentiale an mineralischen Rohstoffen ergeben (z.B. wäre eine Reduzierung der Straßenbreite bei Neubauprojekten und Sanierungen denkbar). Generell sollten Ressourcenaspekte in Investitionsentscheidungen von Infrastrukturen integriert werden und möglichst ressourcenschonende Technologien eingesetzt werden.

Soweit technisch möglich und ökotoxikologisch unbedenklich sollte für notwendige Instandhaltungs- und Ausbauarbeiten Recyclingmaterial verwendet werden. Auch bei der Sanierung von Infrastrukturen am Ende ihrer Lebensdauer (z.B. Brücken und Tunnel) sollten Verfahren mit einer möglichst geringen Ressourcenintensität eingesetzt werden. Für den Rückbau von Infrastrukturen ist – soweit ökotoxikologisch und strahlungstechnisch unbedenklich – ein größtmöglicher Anteil an Recycling anzustreben.

Für leitungsgebundene Infrastrukturen empfiehlt sich ein proaktives Flächenmanagement unter Nutzung der Bebauungsreserven im Bestand (Brachflächen, Baulücken, leer stehende und unterausgelastete Flächen), um den weiteren Ausbau der Leitungslängen zu vermeiden oder zu verringern. Bei Stadtumbauprozessen sollte der Erhalt der baulichen Dichte angestrebt werden, da die Effizienz von technischen Infrastruktu-

ren direkt davon abhängig ist. Daraus folgt, dass eine sinnvolle Rückbaustrategie von den Netzen her einem dispersen Rückbau vorzuziehen ist.

Aufbauend auf den Erfahrungen im Projekt konzentriert sich der weitere Forschungsbedarf auf die Verbesserung der Datenbasis. Viele Hochrechnungen beruhen auf Schätzungen, andere Infrastrukturbereiche mussten gänzlich unberücksichtigt bleiben, da entsprechende Daten nicht vorhanden oder öffentlich nicht zugänglich sind. Die Aufzeichnung von Lage und Typ (inkl. Materialgehalt) erdverlegter Leitungen in kommunalen Katastern sowie eine material- und ortsspezifische Inventarisierung und regelmäßige Fortschreibung des Materialbestands von Unternehmen der Verkehrs-, Wasser- und Energiewirtschaft würde in Zukunft eine genauere Abschätzung der stofflichen Bestände und Flüsse erlauben (insbesondere im Hinblick auf ihre spätere Verwertbarkeit). Desgleichen wäre anzustreben, dass die Netzentur berechtigt ist, in Abstimmung mit den Netzbetreibern, die vorhandenen Daten anonymisiert zur Verfügung zu stellen und so für wissenschaftliche und statistische Zwecke nutzbar zu machen. Insbesondere die jährlichen Materialflüsse für die Erneuerung und Instandhaltung von Infrastrukturen bedürfen einer genaueren Quantifizierung. Sinnvoll wäre daher bspw. die Zusammenarbeit mit Versorgungsunternehmen, um die Daten für ihr spezifisches Versorgungsgebiet (ländlich, städtisch) genauer zu erfassen und die in dieser Studie hier getroffenen Annahmen empirisch zu überprüfen.

Für eine mögliche Reduzierung des Instandhaltungsaufwandes wäre mittels Ökobilanzierung/Materialintensitätsanalyse zu überprüfen, inwieweit alternative Konstruktionsweisen (z.B. Betondeckschichten statt Asphaltdeckschicht im Straßenbau) den Instandhaltungsbedarf reduzieren können und lebenszyklusweit besser abschneiden.

Um die künftig zu erwartenden Mengen für Neubau und Instandhaltung einerseits und Bauabfälle und Bauabbruch andererseits prognostizieren zu können, ist eine dynamische Modellierung der Materialflüsse erforderlich. Dazu wären weitere Analysen zur Altersstruktur der deutschen Infrastruktursysteme notwendig. Auch sollte mit hinreichender Flächendeckung untersucht werden, inwieweit Infrastrukturen bereits zurückgebaut werden, inwieweit Altsysteme aus dem Erdreich entfernt werden und welche Veränderungspotenziale hier zu erwarten sind.

Auf der Grundlage des vorliegenden Inventars der Materiallager in den wesentlichen Infrastruktursystemen sollte eine weitere Entwicklung von Informations- und Managementsystemen für ein potentiell „Urban Mining“ erfolgen, um so einen optimierten Einsatz von Sekundärmaterial aus und im Hoch- und Tiefbau zu ermöglichen.

Literatur

- Angerer, G.; Marscheider-Weidemann, F.; Lüllmann, A.; Erdmann, L.; Scharp, M.; Handke, V. und Marwede, M. (2009): Rohstoffe für Zukunftstechnologien, Stuttgart
- Althaus H.-J.; Chudacoff M.; Hirsch R.; Jungbluth N.; Osses M. and Primas A. (2007): Life Cycle Inventories of Chemicals. Final report ecoinvent data v2.0 No. 8. Swiss Centre for Life Cycle Inventories, Dübendorf, CH
- Ausschuss für Gefahrstoffe (2009): Technische Regeln für Gefahrstoffe, Arbeitsplatzgrenzwerte, TRGS 900, Ausgabe: Januar 2006, zuletzt geändert und ergänzt: GMBI Nr. 28: 605 (02.07.2009)
- Bauer, C. (2008): Life Cycle Assessment of Fossil and Biomass Power Generation Chains. An analysis carried out for ALSTOM Power Services. PSI Bericht Nr. 08-05. Villingen
- BMU/UBA (2010): Altfahrzeug-Verwertungsquoten in Deutschland im Jahr 2008 gemäß Art. 7 Abs. 2 der Altfahrzeug-Richtlinie 2000/53/EG.
http://www.bmu.de/files/pdfs/allgemein/application/pdf/germany_elv_quota_qualityreport.pdf (03.12.2010)
- Brenscheidt, T. (2001): Katalysatorträger: Ein Überblick. In: Hagelüken, C.: Autoabgaskatalysatoren. Renningen
- Bringezu, S. (2000): Ressourcennutzung in Wirtschaftsräumen: Stoffstromanalysen für eine nachhaltige Entwicklung. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg
- Bringezu, S. (2000): Die Analyse der Materialintensität von Infrastrukturen. Wuppertal Institut, Wuppertal, Wuppertal Paper 102
- Buchert, M.; Schüler, D. und Bleher, D. (2009): Critical Metals for Future Sustainable Technologies and Their Recycling Potential. Sustainable Innovation and Technology Transfer Industrial Sector Studies. UNEP DTIE report
- Buchert, M.; Deilmann, C.; Fritsche, U.; Jenseit, W.; Lipkow, A.; Rausch, L.; Schiller, G.; Siedentop, S. (2004): Nachhaltiges Bauen und Wohnen in Deutschland: Stofffluss-bezogene Bausteine für ein nationales Konzept der nachhaltigen Entwicklung – Verknüpfung des Bereiches Bauen und Wohnen mit dem komplementären Bereich „öffentliche Infrastruktur“. UBA-FB 000543. Berlin: Umweltbundesamt
- Classen M.; Althaus H.-J.; Blaser S.; Tuchschnid M.; Jungbluth N.; Doka G.; Faist Emmenegger M. und Scharnhorst W. (2009): Life Cycle Inventories of Metals. Final report ecoinvent data v2.1, No 10. EMPA Dübendorf, Swiss Centre for Life Cycle Inventories, Dübendorf, CH, Online-Version under: www.ecoinvent.ch
- Doka, G. (2007): Wastewater Treatment. Life Cycle Inventories of Waste Treatment Services. Ecoinvent report No. 13, Part IV. Swiss Centre for Life Cycle Inventories, Dübendorf
- Dones, R. (2007): Kernenergie. Ecoinvent report No. 6-VII. Villingen
- Dones, R.; Bauer, C.; Röder, A. (2007): Kohle. Ecoinvent report No. 6-VI. Villingen
- Edelmann, W.; Schleiss, K.; Engeli, H.; Baier, U. (2001): Ökobilanz der Stromgewinnung aus landwirtschaftlichem Biogas. Schlussbericht im Auftrag des Amtes für Energie. Bern
- Emmenegger, M.; Frischknecht, R.; Jungblut, N. (2003): LCA des Mobilfunks UMTS. Uster: ETHZ, Forschungsstiftung Mobilfunkkommunikation

- Europäische Kommission (2010): How to report on end-of-life vehicles according to Commission Decision 2005/293/EC. Revision by Eurostat 20th April 2010, Brüssel.
<http://epp.eurostat.ec.europa.eu/portal/page/portal/waste/documents/ELV%20Guidance%202010%2004%2020rev.pdf> (09.12.2010)
- Hagelüken, C. (2010): Recycling von Edel- und Sondermetallen als Schlüsselbeitrag zur Rohstoffsicherung. Beitrag auf der Konferenz Technologiemetalle, 22.09.2010, Frankfurt
- Hagelüken, C.; Buchert, M. (2010): Kritische Metalle für Zukunftstechnologien und ihr Recyclingpotenzial. Präsentation: Materialforum Rhein-Main, Hanau 18.01.2010.
http://www.preciousmetals.umicore.com/PMR/Media/sustainability/show_kritischeMetalle.pdf (11.11.2010)
- IFA – Institut für Arbeitsschutz der Deutschen Gesetzlichen Unfallversicherung: Gestis Stoffdatenbank
- Forschungsstelle für Energiewirtschaft FfE (1996): Ganzheitliche energetische Bilanzierung der Energiebereitstellung (GaBiE). München
- Frischknecht, R.; Tuchschnid, M.; Faist-Emmenegger, M. (2007): Strommix und Stromnetz. Ecoinvent report No. 6-XVI. Villingen
- Hillenbrand, T. (2009): Analyse und Bewertung neuer urbaner Wasserinfrastruktursysteme. Dissertation, Karlsruhe
- Jekel, M.; Remy, C.; Ruhland, A. (2006): Ecological Assessment of Alternative Sanitation Concepts with Life Cycle Assessment. Final Report for Subtask 5 of the Demonstration Project "Sanitation Concepts for Separate Treatment of Urine, Faeces and Greywater" (SCST)
- JM (Johnson Matthey) (2010): Platinum 2010. Hertfordshire.
<http://www.platinum.matthey.com/publications/market-data-charts/> (11.11.2010)
- Kluge, T.; Koziol, M.; Lux, A.; Schramm, E.; Veit, A. (2003): Netzgebundene Infrastrukturen unter Veränderungsdruck - Sektoranalyse Wasser, netWORKS-Paper No. 2
- Koziol, M.; Veit, A.; Walther, J. (2006): Stehen wir vor einem Systemwechsel in der Wasserver- und Abwasserentsorgung? Sektorale Randbedingungen und Optionen im stadttechnischen Transformationsprozess. netWORKS-Paper Nr. 22
- Kraftfahrzeugbundesamt (2008): Jahresbericht 2007. Flensburg
- Krestin, Oliver (2009): Improving the Recycling of PGM's from Automotive Catalytic Converters. Präsentation auf dem Stakeholder-Workshop des Wuppertal Instituts am 24.04.2009 in Berlin
- LaDou J et al. (2007): Export of Electronics Equipment Waste. In: International Journal of Occupational and Environmental Health, Ausgabe 14/2007; S. 1-10
- Lucas, R.; Wilts, H. (2009): Roadmap - Towards a more efficient recycling of PGM from catalytic converters on an international level. Presented at the experts' workshop at 24th April 2009 in Berlin
- Lünser, H. (1999): Ökobilanzen im Brückenbau. Eine Umweltbezogene, ganzheitliche Bewertung. (Basel, Bosten, Berlin: Birkhäuser)

- Manstein, C.; Stiller, H. (2000): Anwendung der Materialintensitätsanalyse nach dem MIPS-Konzept auf österreichische Verkehrsträgersysteme. Studie des Vereins Faktor4+ im Auftrag des österreichischen Ministeriums für Wissenschaft und Verkehr, Klagenfurt
- MPPI (2009): Guideline on the collection of used mobile phones. Basel
- Okrusch, M. und Matthes, S. (2005): Mineralogie – Eine Einführung in die spezifische Mineralogie, Petrologie und Lagerstättenkunde. Springer Verlag
- Reckerzügl, T. (1997): Vergleichende Materialintensitäts-Analyse zur Frage der zentralen oder dezentralen Abwasserbehandlung anhand unterschiedlicher Anlagenkonzepte; Diplomarbeit an der Universität- Gesamthochschule Paderborn, Abteilung Höxter, erstellt am Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie
- Reidenbach, M.; Bracher, T.; Grabow, B.; Schneider, S.; Seidel-Schulze, A. (2008): Investitionsrückstand und Investitionsbedarf der Kommunen Ausmaß, Ursachen, Folgen, Strategien. Edition Difü. Berlin
- Sander, K.; Schilling, S. (2010): Optimierung der Steuerung und Kontrolle grenzüberschreitender Stoffströme bei Elektroaltgeräten / Elektroschrott. UBA-Texte Nr. 11/2010, Dessau
- Saurat, M.; Bringezu, S. (2008a): Platinum Group Metal Flows of Europe - Part I - Global Supply, Use in Industries and the Shift of Environmental Impacts. In: Journal of Industrial Ecology 12 (5/6): S. 754-767
- Saurat, M.; Bringezu, S. (2008b): Platinum Group Metal Flows of Europe, Part II - Exploring the Technological and Institutional Potential for Reducing Environmental Impacts. In Journal of Industrial Ecology 13 (3), S. 406-421
- Schmied, M.; Mottschall, M. (2010): Treibhausgasemissionen durch Schieneninfrastruktur und Schienenfahrzeuge in Deutschland. Teilgutachten im Rahmen des Forschungsvorhabens "Welches Schienennetz braucht Deutschland?" UBA. Dessau
- Siedentop, S.; Schiller, G.; Koziol, M.; Walther, J.; Gutsche, J.- M. (2006): Siedlungsentwicklung und Infrastrukturfolgekosten – Bilanzierung und Strategieentwicklung. Endbericht
- Statistisches Bundesamt (Destatis) (2009): Öffentliche Wasserversorgung und Abwasserbeseitigung 2007; Fachserie 19 Reihe 2.1.; Wiesbaden: Statistisches Bundesamt
- Statistisches Bundesamt (2009): Warenverzeichnis für die Außenhandelsstatistik. (www.destatis.de)
- Statistisches Bundesamt Deutschland (DeStatis) (2008): Umwelt – Abfallentsorgung. Fachserie 19, Reihe 1. Wiesbaden
- Stiller, H. (1995): Materialintensitätsanalysen von Transportleistungen (2). Binnenschifffahrt. Wuppertal Papers 41. Wuppertal: Wuppertal Institut
- SWICO (2009): 8 Millionen alte Handys warten in der Schweiz aufs Recycling. Medienmitteilung vom 01.4.2009, Zürich
- Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry 6th ed. (2007) Wiley-VCH, Weinheim
- UNEP – United Nations Environment Programme (2010): Recycling of "Specialty Metals" - Key to Boom in Clean-Tech Sector, From Solar and Wind Power to Fuel Cells and Energy Efficient Lighting. Pressemitteilung. New York, 13.05.2010. Quelle: <http://www.unep.org/Documents.Multilingual/Default.Print.asp?DocumentID=624&ArticleID=6564&l=en> (11.11.2010)

- UNEP (1991): Environmental Aspects of Selected Non-Ferrous Metals Ore Mining: A Technical Guide. United Nations Environment Programme, Industry and Environment Programme Activity Centre, Technical Report Series 5
- United Nations University (2008): Review of Directive 2002/96 on Waste Electrical and Electronic Equipment. Final Report. Bonn
- USGS (2009): Mineral Commodity Summaries (metall specific editions). U.S. Geological Survey, January 2009
- Von Rozycki, C.; Koeser, H.; Schwarz H. (2003): Ecology Profile of the German High-speed Rail Passenger Transport System ICE. In: International Journal of Life Cycle Assessment, 8(2), S. 83-91
- Wäger P.; Lang D.; Bleischwitz R.; Hagelüken C.; Meissner S.; Reller A.; Wittmer D. (2010): Seltene Metalle – Rohstoffe für Zukunftstechnologien. Schweizerische Akademie der Technischen Wissenschaften, Zürich
- Weiland-Wascher, A.; Wuttke, J. (2007): Elektroaltgeräte – Abfall oder Produkt?! In: Müll & Abfall, Ausgabe 09/2007, S. 440 – 442
- Wilts, H. (2009): Erweiterte Produzentenverantwortung – Chancen und Grenzen. Institutionen ökologischer Nachhaltigkeit. Normative und institutionelle Grundfragen der Ökonomik. 9.-11. 3. 2009, Tutzing
- Wuppertal Institut (2003): Materialintensitäten von Materialien und Energieträgern im Überblick (MIT-Wertetabelle), Version 2 vom 28.10.2003, http://www.wupperinst.org/info/entwd/index.html?beitrag_id=437&bid=169 (20.12.2010)
- Yu, J.; Williams, E.; Ju, M.; Yang, Y. (2010) : Forecasting Global Generation of Obsolete Personal Computers. Environmental Science & Technology

Task Coordination:

Stefan Bringezu (WI)

Task 2.1: Environmentally Relevant Metallic Raw Materials

Dominic Wittmer (WI), Michael Scharp (IZT), Stefan Bringezu (WI),
Michael Ritthoff (WI), Martin Erren (WI), Christoph Lauwigi (Ifeu),
Jürgen Giegrich (Ifeu)

Task 2.2: Worldwide Recovery of PGM

Rainer Lucas (WI), Henning Wilts (WI), Stefan Bringezu (WI)

Task 2.3: Material Stock and Flows in Infrastructures

Sören Steger (WI), Miriam Fekkak (WI), Stefan Bringezu (WI),
Michael Scharp (ITZ)

Metallic Raw Materials, Worldwide Recovery of PGM and Materials for Infrastructures

Executive Summary

Executive Summary of the results of the Task 2 of the project
„Material Efficiency und Resource Conservation“ (MaRes)



Contact to the Authors:

Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie GmbH
42103 Wuppertal, Döppersberg 19

Task 1: Dominic Wittmer
Tel.: +49 (0) 202 2492 -181, Fax: -138
Mail: Dominic.Wittmer@wupperinst.org

Task 2: Rainer Lucas
Tel.: +49 (0) 202 2492 -260, Fax: -138
Mail: Rainer.Lucas@wupperinst.org

Task 3: Sören Steger
Tel.: +49 (0) 202 2492 -162, Fax: -138
Mail: Sören.Steger@wupperinst.org

"Material Efficiency and Resource Conservation" (MaRes) – Project on behalf of BMU | UBA

Project Duration: 07/2007 – 12/2010

Project Coordination:

Dr. Kora Kristof / Prof. Dr. Peter Hennicke

Wuppertal Institute for Climate, Environment and Energy
42103 Wuppertal, Germany, Döppersberg 19

Phone: +49 (0) 202 2492 -183 / -136, Fax: -198 / -145

E-Mail: kora.kristof@wupperinst.org
peter.hennicke@wupperinst.org

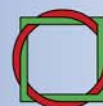
© Wuppertal Institute for Climate, Environment and Energy

More information about the project

"Material Efficiency and Resource Conservation" (MaRes)
you will find on www.ressourcen.wupperinst.org

The project is funded within the framework of the UFOPLAN
by BMU and UBA, FKZ: 3707 93 300

The authors are responsible for the content of the paper.



Wuppertal Institute
for Climate, Environment
and Energy

Wuppertal Institute in Cooperation with

BASF
Borderstep
CSCP
Daimler
demea – VDI / VDE-IT
ECN
EFA NRW
FhG IAO
FhG UMSICHT
FU Berlin
GoYa!
GWS
Hochschule Pforzheim
IFEU
Institut für Verbraucherjournalismus
IÖW
IZT
MediaCompany
Ökopol
RWTH Aachen
SRH Hochschule Calw
Stiftung Warentest
ThyssenKrupp
Trifolium
TU Berlin
TU Darmstadt
TU Dresden
Universität Kassel
Universität Lüneburg
ZEW



Federal Ministry for the
Environment, Nature Conservation
and Nuclear Safety

**Umwelt
Bundes
Amt** 
For our Environment

Metallic Raw Materials, Worldwide Recovery of PGM and Materials for Infrastructures

Executive Summary

Contents

Introduction	3
1 Environmentally Relevant Metallic Raw Materials (Task 2.1)	5
1.1 Objectives and targets of the Task	5
1.2 Results	6
1.2.1 Classification of metals regarding criteria on environmental relevance and rareness	6
1.2.2 Analysis on ten selected metals	6
1.3 Options for action	9
2 Worldwide Recovery of PGM (Task 2.2)	12
2.1 Objectives and targets of the task	12
2.2 Results	13
2.2.1 Conditions and trends in PGM recycling	13
2.2.2 Case study „PGM-recovery from autocatalysts“	15
2.2.3 Case study „PGM-recovery from electrical and electronic equipment“ (EEE)	16
2.3 General aspects of an international governance-approach regulating PGM-material flows for recycling	18
3 Material Stock and Flows in Infrastructures (Task 2.3)	19
3.1 Objectives and targets of the task	19
3.2 Results	20
3.2.1 Transport networks	20

3.2.2	Drinking water and wastewater infrastructures	22
3.2.3	Electricity, gas and district heating networks	22
3.2.4	Telecommunication systems	23
3.3	Recommendations and further research needs	24
Literature		26

Figures

Fig. 1.1:	Reference metal system for displaying the metal systems including the metal losses	7
Fig. 2.1:	Destination of the deregistered German cars in 2008	15

Tables

Tab. 1.1:	Overview on the relative losses within the various processes, and on the total annual material loss of the investigated metals	8
Tab. 2.1:	Development of the global consumption of platinum, palladium and rhodium, based on different application fields (2008 - 2010) in tonnes	13

Introduction

In order to determine the requirements and possibilities of increasing resource efficiency within important, however until today insufficiently researched areas, the knowledge basis towards environmentally relevant metal raw materials, the process for recovering platinum group metals as well as towards those raw materials linked with infrastructures was improved and analysed for possible options of action. The results show that to a considerable extent, there still exists loss of material and environmental pollution along the extraction, processing, utilization and recycling chain which could be decreased by the application of suitable measures. It is particularly necessary to promote return, collection and processing systems in areas where products (new, used or waste) are exported to countries in which, to date no sufficient recycling takes place. Domestically, in turn considerable potentials exist for future use of secondary raw materials, if the type and quantity of the stored materials in infrastructures, their foreseeable durability and the future locality of waste were regularly monitored in the future. Paving the way to „Urban Mining“, which effectively contributes towards the conservation of natural resources.

1 Environmentally Relevant Metallic Raw Materials, Task 2.1

1.1 Objectives and targets of the Task

Metallic raw materials are important for numerous technical applications. Due to the proceeding of technology in many areas, the use of metals increased rapidly within the last decades (more applications and more metals). Accordingly, most of the 60 metals are today used routinely. Thus, numerous metals that are today predominantly applied for specific tasks in small amounts accompany the ferrous metals and base metals that dominate with regard to the amounts of metals used. In this respect, the former metals can be termed as rare. Furthermore, these metals are subject of discussions due to their partly limited availability. For this reason, some of them are also termed as critical metals. Fields of application typical for these metals and with significant growth rates are electric and electronic equipment (including information and telecommunication technology (ICT) and photovoltaics technology, medical technology, and nanotechnology.

As these rare metals have received less attention in technical literature than ferrous and base metals, the availability of knowledge is also relatively limited. This is especially true regarding environmental pressures and material losses along their life cycles and their relevance in the socio-industrial metabolism. The superior aim of the MaResS task “Environmentally relevant metallic raw materials” is the enhancement of the knowledge base on rare metals and thus filling knowledge gaps in order to support the development of appropriate strategies and measures with regard to prevention, substitution, resource efficient production, and circular economy (including international aspects). For this purpose, the following steps have been carried out:

- Screening of potentially environmentally relevant metals: 66 metals (The nonmetals, lanthanides and actinides stayed unconsidered) or metal groups, respectively, were analysed with regard to the criteria reserves, reserve-to-production ratio, annual production, commodity prices, geographic concentration of production and reserves, dissipative use, environmental relevance (by Cumulative Raw Material Demand, Cumulative Energy Demand, and Total Material Requirements) and the application areas. By means of selected criteria, ten metals were identified to be examined in more detail.
- More detailed analyses of ten selected metals with potentially specific relevance. These metals were analysed in more detail with regard to their life cycle material losses and their specific environmental pressures by means of simplified substance flow analyses.

- Options for action: Based on the preceding enhanced analyses, suited measures and strategies were compiled aiming on the reduction of material losses and of the environmental pressures along the life cycle.

1.2 Results

1.2.1 Classification of metals regarding criteria on environmental relevance and rareness

An analysis was carried out on 66 metals with regard to different criteria with the following results:

- Overview of the application areas of the metals including their relative shares in the total use; in addition short descriptions on the applications in the application areas electric and electronic equipment/ICT, medical technology and nanotechnology;
- Annual production, reserves, reserve base and reserve-to-production ratio;
- Geographical concentration of primary production and reserves;
- Determination of dissipative use and other problematic use patterns of the metals;
- Cumulative Raw Material Demand (CRD), Cumulative Energy Demand (CED) and Total Material Requirement (TMR).

The measures CRD and CED were extracted from so-called environmental profiles, which were developed within the project of the Federal Environment Agency “Indicators for the Use of Raw Materials in the Context of the Discussion of Sustainability”; the determination of the TMR was based on analyses by the Wuppertal Institute. The criteria for the metal selection were the measures CRD, CED and TMR in combination with the reserve-to-production ratio and the dissipative use, while also the expected future development of the production of these metals was considered. Based on the classification of the metals with regard to these criteria, ten metals were selected for a more detailed analysis: the precious metals silver (Ag), gold (Au), palladium (Pd), the steel refiners manganese (Mn) and nickel (Ni), the heavy metals tin (Sn), zinc (Zn) as well as the "specialty metals" gallium (Ga), indium (In) and titanium (Ti).

1.2.2 Analysis on ten selected metals

For each of the ten metals, an analysis of the global substance household was performed along the full life cycle according to a defined scheme, in order to increase the comparability between the metals (Fig. 1.1). For each process of the system, both relevant metal losses and relevant specific environmental pressures were determined along the life cycle; this summary focuses on the metal losses that imply an increase

in the primary production and the increased environmental pressures that they are generally involved with¹.

Fig. 1.1: Reference metal system for displaying the metal systems including the metal losses

The undesirable metal flows (losses) are shown dashed. The white boxes are stocks of the corresponding metals.

As expected, the substance flow systems of the single metals vary considerably. With regard to the material losses, the following differentiated pattern was achieved:

- *Relative Material Loss of the Use Phase (RLU)*: This is the annual material loss from use and recycling related to the annual input into the use phase. It varies by factor 8 between the ten metals, ranging from more than 70 % for tin to less than 10 % for gold; it is a question of the “minimal recycling potential” that occurs at the use and recycling phase² (it would be increased by further processes residing domestically);
- *Relative Material Loss of the Total Life Cycle (RLT)*: This is the total annual material loss along the life cycle related to the annual input into the use phase³. They

¹ A complete description of all environmental pressures that emerge could not be carried out in the course of this study due to the multifaceted processes during the production and use of the metals.

² Insofar, this potential is generally located in the sphere of influence of national policies, in contrast to the potential of processes, which are located in foreign countries and are additionally covered by the “Relative Total Material Losses”.

³ Due to the reference to the input into the use phase, relations greater than 100 % are possible.

range between ca. 110 % for manganese and ca. 20 % for gold; it is a question of the “maximal recycling potential” on global scale.

The losses of the other metals are each between the extreme values indicated above. Furthermore, the study reveals, in which life cycle step the relevant material losses occur as shown in Tab. 1.1. Attention should be given to the phenomenon that the environmental relevance of the material losses varies between the metals⁴, however, a comparison between the specific environmental pressures, which are associated with the material losses, was not feasible within this study due to data constraints. Therefore, more studies are required to improve the current data.

Tab. 1.1: Overview on the relative losses within the various processes, and on the total annual material loss of the investigated metals⁵

The symbols show the relevance of the losses by the single processes: xxx = share exceeding 25 %, xx = share between 25 and 10 %, x = share falling below 10 %, o = no significant losses, n.s. = not specified.

	Mn	Sn	Pd	In	Ni	Ag	Zn	Au
Extraction	o	o	xx	n.s.	xxx	xx	n.s.	xxx
Beneficiation	xxx	xx	x	xxx	xx	xx	xxx	n.s.
Processing	xxx	x	x	n.s.	xx	n.s.	n.s.	n.s.
Production	x		x	x	x	n.s.	xx	xx
Use phase	xx	xxx	xx	x	xxx	xxx	x	x
Recycling ⁶	n.s.	n.s.	xxx	x	n.s.	xx	n.s.	xxx

In relation to the input into the use phase, the relative material losses within the total life cycle amount to (figures rounded on 5 %):

RLT [%]	110	80-85	65	50	40-45	35	30	15-20
----------------	------------	--------------	-----------	-----------	--------------	-----------	-----------	--------------

⁴ The environmental pressures are both specific to metals and to processes, as the „ecological rucksack“ grows by progression of the processes.

⁵ For an assessment of the losses of Gallium and Titan, sufficient results were not available. Therefore, a presentation of these was left out here.

⁶ Inclusive so-called „downcycling“, by which the metal loses its specific functionality. Generally, this is associated with a significant loss in value.

1.3 Options for action

For the last years and with increased intensity during the period of the project, diverse professional articles have been published on substance flows of rare and precious metals. These deal predominantly with the possibilities to improve recycling from technical, logistical and institutional points of view⁷. In combination with the specific recycling potentials⁸ determined by means of the ten studies within the scope of this project, the following set of options for action was considered jointly for the diverse metals:

- Increasing the collection volumes of end-of-life products, which contain rare metals in relevant amounts, in Germany and in foreign countries; for example of end-of-life electric and electronic equipment, which contain significant amounts of palladium, gold and silver, as well as used batteries with regard to their manganese content;
- Setting-up or adaptation of existing product-specific collection systems, e.g. for motor vehicles or ICT, in developing countries by governmental or private agendas, in order to allow a subsequent recycling by application of best available techniques on-site or in developed countries⁹; in doing so, protection of efficient collection systems with positive employment effects, and reduction of harmful effects on health and of environmental pressures in the informal recycling sector;
- Setting-up of transnational redistribution systems for scraps of specific product groups, which are relevant for the management of rare metals; for example, the collection performance should be supported within the scope of extending product stewardship for catalytic converters in end-of-life vehicles (ELV) with focus on those countries, where material losses are at the highest. Potential measures are logistical support of collection systems, training courses or agreements to take; potential addressees are manufacturers of vehicles and/or catalytic converters, and specialised recycling companies (via voluntary commitment)(cf. MaResS Task 2.2); long-term security of supply by secondary raw materials could be an incentive for the addressees.
- Support of more detailed manual or automated disassembling respectively, and sorting of old appliances, which contain rare metals in relevant amounts and for which the recovery rate can be increased, e.g. waste of electric and electronic equipment (WEEE) (especially drives, power supply units), or motor vehicles. In fu-

⁷ The articles considered within this study are listed in the final report of task 2.1.

⁸ Attention should be given that in this sub-project the material losses are considered as „theoretical“ potential (i.e. maximal potential to be supposed) to prevent losses. Therefore, the diverse technological and institutional possibilities regarding the „practical“ potential to prevent the material losses should be assessed by a further step.

⁹ Shipping of dismantled and selected components of scrap to (European) BAT recycling plants is called „best of two worlds approach BAT“. BAT means "best available techniques".

ture studies, it will be necessary to determine more precisely, which components have the largest potentials;

- Monitoring of the flows of old goods and of the recovered amounts of metals for inspecting the achievements of the management of rare metals (effectivity and efficiency of the recycling);
- Monitoring of the interfaces of the recycling chain in order to enhance market transparency, including all stakeholders involved in the processing (collection, treatment, recycling);
- Setting-up of a continentally to regionally adapted supply of product-specific treatment and recycling processes that improves the effectivity of the recovery of rare and precious metals globally by differentiated treatment of the end-of-life products and their delivery to sophisticated recycling plants;
- Periodic accounting of the treatment processes with regard to rare metals aiming at the optimisation of processes for the concentration of rare metals in recycling fractions;
- Comparative analysis and evaluation of re-use and recycling referring to the consumption of raw materials and to environmental pressures with regard to regional distinctions and product group-specific differences between recycling systems;
- Classifying and Certification of recycling technologies by criteria on resource efficiency and resource conservation (reducing the raw material requirements and environmental pressures compared to the primary route);
- Cooperative Governance aiming on binding quality standards regarding the treatment and recycling, including the certification of stakeholders, if need be (cf. MaRes Task 2.2);
- Formulation of a national or international target respectively, to reduce the primary raw material requirements of metals considering the raw materials, which were used along the life cycle, for the production of imported goods, with focus on selected sectors, in which relevant recycling potentials exist (e.g. the recovery of a given share of the gold in WEEE and/or the input of a minimum share of secondary metals in the production);
- Localisation of market failure and formulation of potential framework requirements, which enable the market launch of effective, but currently uneconomical treatment and recycling systems for rare metals.

Besides, the geographic component of the substance flows of rare metals is to be considered: Extraction, production, use and recycling of both old metals and of scrap from production are, in general, spatially heterogeneously distributed. Due to the low amounts of turnover of rare metals and the high investment costs for high-tech recycling plants, only relatively few central recycling plants are cost-effective. Thus, the

recirculation of the end-of-life products containing rare metals plays a decisive role. The challenge in this regard is to organise the waste phase of end-of-life products – especially of potential recyclable small electric equipment – in such a way that they are collected as completely as possible.

Beside the collection, the treatment before the actual recycling is vital: Here, the old appliances have to be sorted and separated to route the rare metals to fractions as completely as possible that can be delivered to specialised recycling plants. Thus, from a resource policy point of view, it is required to direct the metal flows, especially the cross-border ones, effectively and efficiently, and to set up collection and treatment systems, which ensure a sufficient collection and treatment performance.

As losses reoccur for each life cycle of the products, besides recycling, also the actual life-time of the products is potentially relevant in order to increase the resource efficiency of the metal systems. However, the prolongation of the life-time of the products competes generally with progress regarding energy efficiency, with progress of the performance of the products, or also with fashion aspects of products. It is suggested to perform scenario analyses for the assessment of recent developments of the life-time of products with regard to their effects on material efficiency.

The knowledge base on the environmentally relevant rare metals could significantly be enhanced and consolidated within MaResS Task 2.1. Nevertheless, the results are intermediate as relevant knowledge gaps and uncertainties still remain that ought to be investigated by more detailed substance flow analyses – based on what has been achieved so far. The largest knowledge gaps with regard to the material losses remain for the metals gallium and titanium regarding the environmental pressures along the life cycle, relevant gaps remain for all metals.

2 Worldwide Recovery of PGM, Task 2.2

2.1 Objectives and targets of the task

Globally the use of platinum group metals (PGM) with its main representatives of platinum, palladium and rhodium in technology-oriented applications continues to increase. The driving factors are the growing demand from industry, particularly in applied fields as autocatalysts and consumer electronics. Simultaneously with these applications the secondary commodity potential grows, which is disposable after the utilisation phase.

From a resource and environmental policy perspective, PGM recycling can make an important contribution to national commodity security, resource conservation and environmental protection.

- **Keyword commodity security:** as the supply of the primary resources depends on very few countries (mainly Russia and South Africa), any additional ton of recycled PGM could help to reduce the dependency on those countries as well as of price developments in oligopolistic structured markets.
- **Keyword resource conservation:** PGM raw material reserves are limited. Increasing PGM recycling could preserve primary resources and save them for future generations.
- **Keyword environmental and climate protection:** PGM recycling is associated with distinctly lower environmental impacts as the extraction of primary resources.

Nevertheless, the economic and environmental benefits of PGM recycling have not yet been sufficiently exploited, mainly due to the export of used cars and used electronic equipment to countries lacking an adequate recycling infrastructure. Because of this PGM material gets lost for a global recycling treatment. At the same time dissipative applications are increasing in the electronics sector; those very small quantities cannot be recovered with conventional recycling technologies.

Against this background, the task "Worldwide Recovery of PGM" develops proposals for an optimisation of an international PGM resource management in selected application fields. For this purpose, the following steps were carried out:

- Identification of potentially problematic export flows and of significant PGM losses in different application fields.
- More detailed actor-related case studies in the fields of autocatalysts and selected consumer electronics (mobile phones and flat screens); deficit analysis relating to logistic collection, dissipative losses and regulatory deficiencies in selected target countries

- Deduction of strategies und measures leading to prevention of PGM losses and substitution of PGM material as well as a more efficient international PGM recycling. Priorisation of the proposed options.

2.2 Results

2.2.1 Conditions and trends in PGM recycling

Nearly 50 percent of the (primary and secondary) production of platinum, palladium and rhodium are used in autocatalysts. Other important applications include electronics, jewellery and process catalysts in the chemical and petroleum refining.¹⁰

PGM demand is influenced by different market based and technological factors. After the sales declined due to the economic and financial crisis in 2009, a mass related growth of primary production reappeared in 2010, which is in particularly driven by technological application areas. Also the increasing importance of photovoltaics and electro-mobility as application fields should be recognised (see Hagelüken/Buchert 2010). PGM consumption in various demand sectors and their development in the last 3 years is shown in Tab. 2.1.

Tab. 2.1: Development of the global consumption of platinum, palladium and rhodium, based on different application fields (2008 - 2010) in tonnes

<i>Platinum</i>	2008	2009	2010	<i>Palladium</i>	2008	2009	2010	<i>Rhodium</i>	2008	2009	2010
Auto catalysts	103,6	61,9	84,6	Auto catalysts	126,5	114,8	146	Auto catalysts	21,7	17,5	20,6
Electro	6,5	5,3	6,3	Electro	38,8	36,0	39,8	Electro	0,08	0,08	0,1
Invest	15,7	18,7	12,3	Invest	11,9	17,7	18,9				
Jewellery	58,4	79,6	68,6	Jewellery	27,9	21,9	17,8				
Glass	8,9	0,2	10,3					Glass	0,9	0,5	1,6
Medicine	6,9	7,0	7,2	Dental	17,7	18,0	17,5				
Chemistry	11,3	8,2	12,7	Chemistry	9,9	9,2	10,9	Chemistry	1,9	1,5	1,8
Others	15,0	11,3	12,0	Others	2,1	1,9	2,2	Others	0,6	0,5	0,5
Con- sumption	226,5	192,6	214,3	Con- sumption	235,0	219,7	253,4	Con- sumption	25,4	20,2	24,8
Recycling	51,8	39,8	52,1	Recycling	45,7	40,5	52,3	Recycling	6,4	5,3	6,7
Net con- sumption	174,6	152,8	162,1	Net con- sumption	189,2	179,1	201,1	Net con- sumption	18,9	14,9	18,0
Stocks	6,2	18,0	8,2	Stocks	18,0	22,1	1,2				

Source: Own combination and calculation in tonnes on the basis of indications in Johnson Matthey 2010. The values for 2010 are estimated values on the basis of the first 9 months, growth rate in bold.

¹⁰ See also data in Tab. 1.1

The presented data shows that there was a distinct shift during the world economic crisis of 2009 from technology-related applications to value-related uses and that in general the consumption decreased in the crisis year 2009. The area of autocatalysts is for all three metals distinctly the dominant application area. Here it is significant that the proportions between platinum and the lower cost palladium have shifted distinctly¹¹. In the field of glass applications for platinum and rhodium there is a significant growth in demand, but also the consumption of platinum and palladium in the chemical industry shows increasing values.

Recycling is increasingly becoming a strategic relevance for commodity security, since there are considerable problems in the expansion of primary production, which in Russia is coupled to the nickel production and in South Africa continually affected by the lack of power.

Despite these constraints, there are still large differences in the cycle of PGM. In industrial applications, for example industrial catalysts reach recycling rates of up to 90 % (see Saurat/ Bringezu 2008 & 2008a). In contrast to this, the recycling rates in the fields of consumer goods are much worse. For example, the contribution of recycling for the supply of palladium in automobile exhaust catalysts is 26 % in 2010 (in 2006 it was 20 %). In the consumer electronics sector the recycling quota is set to rise from 19 % in 2006 to 31 % in 2010 (JM 2010, p. 36). JM expects most of the recycling quotas in open loop systems to improve, due to more effective government incentive schemes. Looking at this it should be considered that due to the decline in prices in 2009 a lot of material was stored, which reached the market with a time lag in 2010. Therefore it should be observed whether the high recycling quota can be stabilised in future.

An important trend is the rising internationalisation of PGM flows. An increasing part of secondary resources is accumulated in the growing product related stocks of the so called emerging nations. Because of this the globally acting smelters/refiners started to establish international redistribution systems providing there „Integrated Smelters“ with input. Those activities are mostly separated from the stateside waste regulation and differ from country to country.

A significant amount of PGM material goes to countries without an adequate recycling infrastructure (like Russia, countries in Middle-Asia, South-East Asia, Middle East and West Africa). Those shifting stocks from Germany to other countries are due to the export of used (and new) consumer goods as cars and consumer electronics.

This problematic has been particularly tackled in two case studies: 1. Autocatalysts (see index 2.2.2) and 2. Consumer Electronics (see index 2.2.3).

¹¹ While palladium is used to large parts in gasoline engines, in diesel vehicles now mainly the much more expensive platinum is used, which is effective even at lower operating temperatures (see Brenscheidt 2001, 24).

2.2.2 Case study „PGM-recovery from autocatalysts“

In 2008 only 15 % of a total of 3 Million deregistered German cars has been brought to waste treatment in Germany, 8 % has been exported as used cars to other EU-countries (mainly the new member states, BMU/UBA 2010). Further on – after a time of using – those cars are exported again to Non-EU-Countries. 23 % of the outflow is statistically unidentified. The following illustration shows an update of the statistical exports:

Fig. 2.1: Destination of the deregistered German cars in 2008

Source: BMU/UBA 2010 related to data of Kraftfahrtbundesamtes (Deregistration, Re-registration) and the Federal Statistic Agency (Waste Statistics, Foreign Trade Statistics)

On the basis of the available statistical sources a reliable assessment is not possible. The registration of exported cars within the foreign trade statistics relating to the inter-European trade is incomplete due to turnover-related registration duties. Another failure is due to various registration criteria in EU-countries. Last but not least follow-up exports of imported cars are totally intransparent. Against this background it can be very much appreciated that the EU-Commission and Eurostat has launched an instruction how to come to a better and more comparative data base in the case of end-of-life vehicles treatment (European Commission 2010).

As a result of the expert interviews and the country studies it is obvious, that the exports to the GUS-countries and the middle-Asian countries (like Kazakhstan) are getting more and more important. Those are countries in which the national car fleets are growing rapidly, but at the same time where there is no effective recycling scheme and awareness of car functionality. Those framing conditions are strongly related to the ability of PGM-recycling.

The country studies also showed the relation between car fleet modernisation and PGM potential. In coming years - for example in the metropol regions of Russia (Moscow, St. Petersburg) – most of the passenger cars will be equipped with a common threeway catalysts converter. For those new cars an additional risk of PGM-losses can be expected if not a stricter technical control of cars will be established. Poor maintenance request in combination with poor condition of streets will lead to more damages of autocatalyst converters and to dissipative losses of the PGM-loadings. In fact, we could indentify only some unsystematic practice of catalyst recycling, mostly in grey markets with unregistered outflows of PGM from country to country.

Bringing some of the discussed problems to a solution a roadmap was created by the project team and presented to different stakeholders at a workshop in Berlin held in 2009 (Lucas/Wilts 2009). The proposed measures for optimising the global PGM-recovery, which were welcomed by the participants of the workshop, are the following:

- A stronger commitment between the actors in the PGM-redistribution-chain addressing common quality standards for dismantling processes, catalytic converters logistics and conditioning.
- Obligation of the car companies and catalyst producers for a recycling quota related to their production and targets for the use of secondary PGM
- Establishing redistribution systems from the target markets of used car exports to the integrated smelters. Strengthening producer's responsibility by the industrial partners (car industries, converters producers).
- Technical marking by means of RFID: In general this could help to indentify export flows and the final destination of autocatalysts as well as support the redistribution management of private companies. On the other hand the declaration duties of car retailers should be extended.

For all these measures, a time window of 10 to 15 years is needed, because within this time frame most of the cars in the target countries will be equipped with a conventional three way converter. This may differ from country to country.

2.2.3 Case study „PGM-recovery from electrical and electronic equipment” (EEE)

The volume of WEEE in the EU is growing faster than all other fractions of municipal waste (cf. UNU 2008, 3). From a technical point of view recovery rates up to 95% can be achieved by the recycling of printed circuit boards that contain the bulk of the palladium. The relevant deficits are on the one hand the redistribution and the other hand the proper treatment and processing. A major problem is the fact that relevant quantities of used EEE leave the European Economic Area. According to Sander/ Schilling (2010), in 2008 approximately 155,000 t of used EEE exports electrical and electronic equipment have been exported from Germany, including about 2 million monitors. On

a global scale one must assume that only about 10% are actually recycled (cf. LaDou et al. 2007 and UNEP 2010). However, an international market for re-use could certainly be established in the medium term based on internationally binding commitments to high quality standards for recycling.

The monitors and mobile phones, the palladium containing products analyzed in detail, are characterized by different circumstances: Mobile phones on the one hand are usually legally exported as a functioning used equipment with a positive market value, monitors on the other hand (especially CRT monitors) are normally illegal exports because of the costs of disposal in Germany exceeding the total export costs. But also domestically deficits result in the circulation result because waste EEE is not collected within the dedicated systems with a high-quality recycling. For both products together, mobile phones and monitors, at the present state of the art recycling an additional theoretical potential for Germany of about 0.75 t PGM was estimated, which would exceed the total European net demand for electronic applications (see JM 2010).

Based on this analysis the developed policy proposals address different spatial levels and aim to improve the coordination of existing initiatives in the field of used and waste EEE. The underlying approach is to strengthen the producer responsibility for the end of life phase of its products, as stated in the WEEE-Directive, but so far undermined by legal and illegal exports (cf. Wilts 2009). Specific priority should be given to the following measures:

- Approaches of technology and knowledge transfer should be extended to those developing and emerging countries where the use phase of electrical and electronic equipment ends (both imported and domestically generated). These countries are usually characterized by very high collection-rates, but completely lack the necessary recycling infrastructure (cf. Yu et al. 2010). This could open up significant win-win potentials, if the precious metals such as on dismantled circuit boards are supplied to the internationally networked smelters instead of to a backyard recycling causing severe risks to health and environment. The revenues of recovery significantly exceed the additional transportation costs (cf. Hagelüken 2010).
- For mobile phones there is a need to significantly increase the domestic collection rate. Best practice examples for optimized redistribution systems for example with designated recycling fees in combination with intensive public relations (national day of action, teaching materials, etc.) exist e.g. in Switzerland (cf. SWICO 2009). A deposit system for mobile phones could be an additional incentive (cf. MPPI 2009).
- With regard to monitors the illegal export of waste products has to be contained by product-specific regulations for the distinction between waste and used equipment. In addition, the devices should be no longer collected together with bulky waste from the roadside. Direct collection of waste EEE from households could avoid damages and the theft of valuables (Sander / Schilling 2010) as well as increase transparency and security.

2.3 General aspects of an international governance-approach regulating PGM-material flows for recycling

The investigations described here indicate in both action fields that international management of secondary PGM-resources is strongly influenced by international market development and less influenced by national waste regulation. In the near future an international obligatory regulation of this issue within the wto-regime can probably not be expected. Because of this background we propose a cooperative governance approach which should lead the actors in the recycling value chain to a more obligatory understanding of quality standards and environmental targets. For the implementation of those standards the international acting refiners of PGM-material could take a leading role because they will benefit directly by this kind of agreement.

Such cooperative structures could be supported bilateral or multilateral by government activities or their subordinated environmental agencies. Also UNEP with its international resource panel could play an important role by co-ordinating the experience exchange about how to improve the efficiency of international acting recycling systems (see UNEP 2010). But at least the key for a new recycling model lies in the hands of the big players in the refining business and their customers in the car industry.

Public authorities could help to optimise the information flow in the PGM-recycling chain by addressing more reporting duties mainly of the retailers. Furthermore, the aimed standards for best available technologies should be considered by laws (Like-wise ELV and WEE Regulation). Another field of governmental action should be the different technology and qualification levels between OECD-countries and the target countries, which import used consumer goods. A convenient tool for problem solving could be the promotion of technology and a qualification programme, which would enable the target countries to establish a systematic dismantling, collection and redistribution of PGM containing consumer goods. This programme should be initially designed for new EU-member states and CEEC-countries. As far as we know new refining plants in the emerging economies are not being planned, so the existing redistribution routes will remain in the meantime. It can be expected that upon condition of free trade international material flows of secondary PGM will go ahead.

3 Material Stock and Flows in Infrastructures, Task 2.3

3.1 Objectives and targets of the task

Infrastructure systems can cause severe environmental impacts, as they require large quantities of raw materials for their construction and maintenance. A sustainable resource management should hence aim at decreasing the absolute quantity of primary raw materials while increasing the proportion of secondary raw materials being used. In order to provide the required basic data, task 2.3 of the MaRes-Project analysed relevant on-grid infrastructures in Germany in terms of their material stocks and annual material flows for maintenance and expansion. Four infrastructure systems were considered:

- transport networks,
- drinking water and wastewater infrastructures,
- communication systems,
- electricity, gas and district heating networks.

Analysing the material stocks and annual material flows of relevant infrastructures provides an input to a consistent country-wide data base, in order to identify and discuss potentials for resource conservation in infrastructures. Furthermore, the project provides useful information about which materials are potentially available for recycling purposes when infrastructures are being dismantled and can be useful for assessing the material dimension of certain energetic development goals (e.g. DENA national grid studies).

The part has been divided into four steps:

- Step I: Identify relevant types of infrastructure / reference systems;
- Step II: Determine the present size of infrastructures and amount of the material bound in the reference systems;
- Phase III: Determine the annual material flows of the reference systems;
- Phase IV: Conclusions and further research needs.

In most cases, a bottom-up-approach has been used in order to determine the material stocks and flows: Lengths / numbers of the particular reference systems have been linked with specific material coefficients and extrapolated to the total stock (or the annual expansion or renovation). When possible, material flows resulting from the dismantling of infrastructures have been calculated in the same way. We determined the specific material coefficients by analysing relevant databases and literature (Ecoinvent, various life cycle analyses), complemented by extensive own research (technical litera-

ture, product catalogues, expert interviews). In order to systematically determine and visualise inputs, outputs and stocks of materials in infrastructures, we used the material flow analysis (MFA). Furthermore, we determined the total material requirement (TMR) of the identified material stocks and flows in order to calculate the specific ecological rucksack and hence illustrate the ecological relevance of the particular reference systems.

3.2 Results

3.2.1 Transport networks

In terms of transport networks, we analysed material stocks and annual flows of streets as well as railways and waterways, including civil engineering structures (bridges, tunnels along railways and motorways, gates and harbours along waterways).

The material stocks of the German road network (more than 7.3 billion tons) were calculated for one square meter reference-road based on technical road construction standards, which define the build-up of different street categories. The results were then extrapolated on the total length of the German road network, based on reference profiles. Annual renovation needs have been extrapolated based on the specific operating life.¹² Material stocks include the road space as well as the civil engineering structures along motorways. Food and bicycle paths, noise and beam barriers, which are also parts of the road network, have not been included. In terms of the railway material stocks, we could use data of another recent UBA-project (Schmied/Mottschall 2010) and hence make reliable calculations of the material stock (1.35 billion tons). Extrapolations of the material bound in waterways (more than 200 million tons), including inner harbours, are based on earlier analyses at the Wuppertal Institute (Stiller 1995; Manstein/Stiller 2000).

The quantity of mineral building material bound in the road network is multiple times higher than in other infrastructure systems. Furthermore, the annual material flows in transport networks, in contrast to other infrastructure systems, are mainly induced by maintenance and renovation: Annual material flows for the maintenance of roads and streets (104 million tons) are five times higher than for expansion activities (21 million tons). Due to their length, municipal roads in terms of expansion as well as maintenance induce the majority of material flows. In contrast, motorways are the most material intensive type of road in relation to their length. The railway network, too, induces the better part of its annual material flows for maintenance reasons, as there is nearly no expansion taking place any more. Regarding water ways, the annual material flows induced by maintenance activities could not be reliably calculated due to lack of data.

¹² As far as no detailed information was available, we proceeded the same way for other infrastructures.

Hence, annual material flows have only been calculated based on expansion and up-grading activities¹³.

¹³ Renovation and expansion of sluices often go hand in hand and are hence hard to distinguish.

3.2.2 Drinking water and wastewater infrastructures

The following reference systems in the field of drinking water and wastewater infrastructures were identified and analysed:

- Water supply infrastructures: barrages, water works, cisterns, pipe network
- Wastewater infrastructures: sewer network, inspection chambers, stormwater overflow, wastewater treatment plants

Partly we could use existing material coefficients from other analyses, which merely had to be modified with regard to German conditions. In addition, extensive research in technical literature, product catalogues and expert interviews in most cases lead to a reliable data basis. However, through the project it became clear that particularly concerning annual material flows data needs to be improved.

Water and wastewater infrastructures tie up around 1.8 billion tons of materials. These consist mainly (99%) of mineral construction materials, due to the pipe beddings. In addition, reinforced concrete plays a major role in the construction of wastewater facilities (475 million tons). In contrast, metals (around 20 million tons, mainly steel and iron) and plastics (< 2 million tons) only play a minor role. Furthermore, they are in most cases built in underground pipe networks, hence poorly accessible.

Annual material flows are still caused by mainly expansion rather than (various) maintenance and renovation activities. However, the calculated annual flows are probably underestimated due to insufficient data, particularly with regard to maintenance and renovation. For renovation activities, material input even lies below material output due to the use of new materials (plastics).

However, against the background of expected massive investment needs¹⁴ for renovation in German water and wastewater infrastructures, annual material flows are expected to grow more significant in the future.

3.2.3 Electricity, gas and district heating networks

The analysed energy infrastructures can be differentiated into energy production and energy distribution. In this part we analysed nine types of energy production¹⁵. We did not include facilities with low relevance for the German energy supply (e.g. geothermal energy) and those serving mainly household self supply (photovoltaic). In terms of energy distribution systems, data for electricity, gas and district heating grids have been calculated.

¹⁴ Projections range from 65 (Reidenbach et al. 2008) to 150 to 250 billion Euro (Kluge et al. 2003) for municipal replacement expenditures in the field of water and wastewater infrastructures.

¹⁵ These are conventional power plants (black coal, lignite), gas power plants, nuclear power plants as well as water and wind power plants (on-shore) and biogas for renewable energy production. In addition, cogeneration and block heat and power plants have been assessed.

The material stocks of the energy distribution grids (650 million tons) are – mainly due to the sandbeds (585 million tons) – more material intensive than the energy production infrastructure (88 million tons). Besides sand, it is mainly concrete (94 million tons) and steel (37 million tons) which dominate the material stocks of energy infrastructures – similar to water and wastewater infrastructures.

Most conventional power plants have reached the end of their life cycle and need to be renovated or replaced by other energy production facilities – e.g. based on decentralised renewable energy sources. This induces relevant material flows. Our analyses show that decentralised facilities are also linked with high material flows for their construction. On the other hand, the construction phase of renewable energy plants is more than compensated by their utilisation phase, when they induce only little material flows for maintenance activities and consume much less fossil resources than conventional power plants. With an expansion of decentralised energy production facilities and a regional shift of the energy supply (offshore wind energy in Northern Germany), expenditures for power line construction on all voltage-levels will rise. Overall, annual material flows in the area of power grids and renewable energy production are still based on expansion and upgrading rather than renovation and maintenance.

3.2.4 Telecommunication systems

Originally, the project scheduled to analyse the communication infrastructure in terms of fixed and mobile networks. However, fixed network infrastructures could not be analysed, as no data with regard to their expansion was accessible. Company data or data from the Federal Network Agency (BNetzA) could not be used due to business secrets confidentiality obligations.

First, material stock and flows of the mobile networks (GSM, UMTS) were assessed, based on information of network operators and life cycle inventory analyses. As data from different sources is not consistent, we worked with ranges. Other studies that worked on the material dimension of information and communication technologies (e.g. Borderstep-study on behalf of the UBA on material stocks of computing centres) have already shown that the particular ICT-components of the mobile network cannot be divided into separate material categories due to aggregated data. More complex modules can in most cases only be calculated with regard to their weight but not divided into different material categories. Due to the dynamic development of network technologies, LCA-studies are often out-dated after only two years.

An essential finding is, that the material stocks (around 137 thousand tons) as well as the annual material flows (around 17.000 tons) in mobile network infrastructures are comparably irrelevant in comparison to the other three infrastructure systems. If material stocks of fixed network infrastructures were included, the significance of the communication systems for the total infrastructure material stock would be much higher (sandbeds of copper cables). Furthermore, the current ICT-infrastructure offers a high recycling-potential, due to the future expectedly net-conversion into glass fibre cables.

3.3 Recommendations and further research needs

Growing Material Stocks generally lead to increasing material flows for maintenance and renovation. Any expansion activities should hence be generally questioned. Limiting the scope of infrastructure systems is necessary in order to get the constantly growing maintenance costs under control and to restrict the increasing consumption of resources.

With regard to road construction, reviewing the construction standards in co-operation with civil engineers and other experts (e.g. road safety) could lead to enormous saving potentials of mineral construction materials (thinking e.g. of reducing the road width when expanding or renovating). Resource aspects should become part of investment decisions of infrastructures as a matter of principle, combined with preferably resource conserving technologies. When renovating infrastructures at the end of their life-cycle (e.g. bridges and tunnels), resource efficient processes should be preferred.

As far as technically possible and ecotoxicologically harmless recycling material should be used for required maintenance and expansion activities. When dismantling infrastructures, the proportion of recycling should be maximised.

For grid-bound infrastructures it makes sense to pursue a strategy of pro-active land management: That means to use existent area reserves (brownfields, empty building lots, vacant areas), in order to prevent or minimise further expansion of pipes and cables. Furthermore, processes of urban consolidation should aim at preserving a structural density, thus sustaining the efficiency of on-grid infrastructures. Hence, a grid deconstruction should take place from the ends instead of running disperse.

Built on the project's experiences, further research needs focussing on improving the data basis. Many extrapolations are based on assumptions, other infrastructures had to be neglected, as adequate data was not existent or accessible. It would be helpful for future analyses of material stocks and flows (especially regarding their later usability potential), if municipal cadasters would integrate position and type (incl. material) of underground sewers, pipes and cables; or if network operators would inventory and regularly update their material stocks. Furthermore we recommend that the data of the Federal Network Agency, accredited by the net operators, should be made (anonymously) accessible for scientific analyses, in order to make use of them for scientific and statistic purposes.

The annual material flows for renovation and maintenance in particular need to be analysed in more detail. Therefore, it would make sense to co-operate with a utility, in order to analyse the data precisely for their specific service area (rural, urban) and empirically assess the underlying assumptions.

For a potential reduction of maintenance needs, LCAs should be used in order to analyse, how far alternative constructions (e.g. concrete surface replacing asphalt surface

in road construction) can reduce maintenance intervals and hence minimise overall environmental impacts.

In order to better forecast future material flows for construction and renovation on the one hand, for solid waste on the other, a dynamisation of the present material flow analysis is required, based on the age structure of the German infrastructure systems. Furthermore it should be analysed, how far infrastructures are being deconstructed at present and if they are being withdrawn from underground.

Based on the provided material inventory, information and management systems for a potential urban mining need to be further developed, in order to foster a sustainable resource management based on an optimised use of secondary raw materials from and into civil engineering.

Literature

- Angerer, G.; Marscheider-Weidemann, F.; Lüllmann, A.; Erdmann, L.; Scharp, M.; Handke, V.; Marwede, M. (2009): Rohstoffe für Zukunftstechnologien, Stuttgart
- Althaus H.-J.; Chudacoff M.; Hirsch R.; Jungbluth N.; Osses M. and Primas A. (2007): Life Cycle Inventories of Chemicals. Final report ecoinvent data v2.0 No. 8. Swiss Centre for Life Cycle Inventories, Dübendorf, CH
- Ausschuss für Gefahrstoffe (2009): Technische Regeln für Gefahrstoffe, Arbeitsplatzgrenzwerte, TRGS 900, Edition: January 2006, lastly changed and completed: GMBI Nr. 28: 605 (02.07.2009)
- Bauer, C. (2008): Life Cycle Assessment of Fossil and Biomass Power Generation Chains. An analysis carried out for ALSTOM Power Services. PSI Bericht Nr. 08-05. Villingen
- BMU/UBA (2010): Altfahrzeug-Verwertungsquoten in Deutschland im Jahr 2008 gemäß Art. 7 Abs. 2 der Altfahrzeug-Richtlinie 2000/53/EG.
http://www.bmu.de/files/pdfs/allgemein/application/pdf/germany_elv_quota_qualityreport.pdf (03.12.2010)
- Brenscheidt, T. (2001): Katalysatorträger: Ein Überblick. In: Hagelüken, C.: Autoabgaskatalysatoren. Renningen
- Bringezu, S. (2000): Ressourcennutzung in Wirtschaftsräumen: Stoffstromanalysen für eine nachhaltige Entwicklung. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg
- Bringezu, S. (2000): Die Analyse der Materialintensität von Infrastrukturen. Wuppertal Institute, Wuppertal, Wuppertal Paper 102
- Buchert, M.; Schüler, D.; Bleher, D. (2009): Critical Metals for Future Sustainable Technologies and Their Recycling Potential. Sustainable Innovation and Technology Transfer Industrial Sector Studies. UNEP DTIE report
- Buchert, M.; Deilmann, C.; Fritsche, U.; Jenseit, W.; Lipkow, A.; Rausch, L.; Schiller, G.; Siedentop, S. (2004): Nachhaltiges Bauen und Wohnen in Deutschland: Stofffluss-bezogene Bausteine für ein nationales Konzept der nachhaltigen Entwicklung – Verknüpfung des Bereiches Bauen und Wohnen mit dem komplementären Bereich „öffentliche Infrastruktur“. UBA-FB 000543. Berlin: Umweltbundesamt
- Classen M.; Althaus H.-J.; Blaser S.; Tuchschnid M.; Jungbluth N.; Doka G.; Faist Emmenegger M.; Scharnhorst W. (2009): Life Cycle Inventories of Metals. Final report ecoinvent data v2.1, No 10. EMPA Dübendorf, Swiss Centre for Life Cycle Inventories, Dübendorf, CH. Online-Version at: www.ecoinvent.ch
- Doka, G. (2007): Wastewater Treatment. Life Cycle Inventories of Waste Treatment Services. Ecoinvent report No. 13, Part IV. Swiss Centre for Life Cycle Inventories, Dübendorf
- Dones, R. (2007): Kernenergie. Ecoinvent report No. 6-VII. Villingen
- Dones, R.; Bauer, C.; Röder, A. (2007): Kohle. Ecoinvent report No. 6-VI. Villingen
- Edelmann, W.; Schleiss, K.; Engeli, H.; Baier, U. (2001): Ökobilanz der Stromgewinnung aus landwirtschaftlichem Biogas. Schlussbericht im Auftrag des Amtes für Energie. Bern

- Emmenegger, M.; Frischknecht, R.; Jungblut, N. (2003): LCA des Mobilfunks UMTS. Uster: ETHZ, Forschungsstiftung Mobilfunkkommunikation
- Europäische Kommission (2010): How to report on end-of-life vehicles according to Commission Decision 2005/293/EC. Revision by Eurostat 20th April 2010, Brüssel. <http://epp.eurostat.ec.europa.eu/portal/page/portal/waste/documents/ELV%20Guidance%202010%2004%2020rev.pdf> (09.12.2010)
- Hagelüken, C. (2010): Recycling von Edel- und Sondermetallen als Schlüsselbeitrag zur Rohstoffsicherung. Beitrag auf der Konferenz Technologiemetalle, 22.09.2010, Frankfurt
- Hagelüken, C.; Buchert, M. (2010): Kritische Metalle für Zukunftstechnologien und ihr Recyclingpotenzial. Präsentation: Materialforum Rhein-Main, Hanau 18.01.2010. http://www.preciousmetals.umicore.com/PMR/Media/sustainability/show_kritischeMetalle.pdf (11.11.2010)
- IFA – Institut für Arbeitsschutz der Deutschen Gesetzlichen Unfallversicherung: GESTIS-database on hazardous substances
- Forschungsstelle für Energiewirtschaft FfE (1996): Ganzheitliche energetische Bilanzierung der Energiebereitstellung (GaBiE). München
- Frischknecht, R.; Tuchscheid, M.; Faist-Emmenegger, M. (2007): Strommix und Stromnetz. Ecoinvent report No. 6-XVI. Villingen
- Hillenbrand, T. (2009): Analyse und Bewertung neuer urbaner Wasserinfrastruktursysteme. Dissertation, Karlsruhe
- Jekel, M.; Remy, C.; Ruhland, A. (2006): Ecological Assessment of Alternative Sanitation Concepts with Life Cycle Assessment. Final Report for Subtask 5 of the Demonstration Project "Sanitation Concepts for Separate Treatment of Urine, Faeces and Greywater" (SCST)
- JM (Johnson Matthey) (2010): Platinum 2010. Hertfordshire. <http://www.platinum.matthey.com/publications/market-data-charts/> (11.11.2010)
- Kluge, T.; Koziol, M.; Lux, A.; Schramm, E.; Veit, A. (2003): Netzgebundene Infrastrukturen unter Veränderungsdruck - Sektoranalyse Wasser, netWORKS-Paper No. 2
- Koziol, M.; Veit, A.; Walther, J. (2006): Stehen wir vor einem Systemwechsel in der Wasservers- und Abwasserentsorgung? Sektorale Randbedingungen und Optionen im stadttechnischen Transformationsprozess. netWORKS-Paper Nr. 22
- Kraftfahrzeugbundesamt (2008): Jahresbericht 2007. Flensburg
- Krestin, O. (2009): Improving the Recycling of PGM's from Automotive Catalytic Converters. Präsentation auf dem Stakeholder-Workshop des Wuppertal Instituts am 24.04.2009 in Berlin
- LaDou J et al. (2007): Export of Electronics Equipment Waste. In: International Journal of Occupational and Environmental Health, Ausgabe 14/2007; pp. 1-10
- Lucas, R.; Wilts, H. (2009): Roadmap - Towards a more efficient recycling of PGM from catalytic converters on an international level. Presented at the experts' workshop at 24th April 2009 in Berlin
- Lünser, H. (1999): Ökobilanzen im Brückenbau. Eine Umweltbezogene, ganzheitliche Bewertung. (Basel, Bosten, Berlin: Birkhäuser)

- Manstein, C.; Stiller, H. (2000): Anwendung der Materialintensitätsanalyse nach dem MIPS-Konzept auf österreichische Verkehrsträgersysteme. Studie des Vereins Faktor4+ im Auftrag des österreichischen Ministeriums für Wissenschaft und Verkehr, Klagenfurt
- MPPI (2009): Guideline on the collection of used mobile phones. Basel
- Okrusch, M.; Matthes, S. (2005): Mineralogie – Eine Einführung in die spezifische Mineralogie, Petrologie und Lagerstättenkunde. Springer Verlag
- Reckerzügl, T. (1997): Vergleichende Materialintensitäts-Analyse zur Frage der zentralen oder dezentralen Abwasserbehandlung anhand unterschiedlicher Anlagenkonzepte; Diplomarbeit an der Universität-Gesamthochschule Paderborn, Abteilung Höxter, erstellt am Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie
- Reidenbach, M.; Bracher, T.; Grabow, B.; Schneider, S.; Seidel-Schulze, A. (2008): Investitionsrückstand und Investitionsbedarf der Kommunen Ausmaß, Ursachen, Folgen, Strategien. Edition Difü. Berlin
- Sander, K.; Schilling, S. (2010): Optimierung der Steuerung und Kontrolle grenzüberschreitender Stoffströme bei Elektroaltgeräten / Elektroschrott. UBA-Texte Nr. 11/2010, Dessau
- Saurat, M.; Bringezu, S. (2008): Platinum Group Metal Flows of Europe - Part I - Global Supply, Use in Industries and the Shift of Environmental Impacts. In: Journal of Industrial Ecology 12 (5/6): pp. 754–767
- Saurat, M.; Bringezu, S. (2008): Platinum Group Metal Flows of Europe, Part II - Exploring the Technological and Institutional Potential for Reducing Environmental Impacts. In Journal of Industrial Ecology, pp. 406-421
- Schmied, M.; Mottschall, M. (2010): Treibhausgasemissionen durch Schieneninfrastruktur und Schienenfahrzeuge in Deutschland. Teilgutachten im Rahmen des Forschungsvorhabens "Welches Schienennetz braucht Deutschland?" UBA. Dessau
- Siedentop, S.; Schiller, G.; Koziol, M.; Walther, J.; Gutsche, J.- M. (2006): Siedlungsentwicklung und Infrastrukturfolgekosten – Bilanzierung und Strategieentwicklung. Endbericht
- Statistisches Bundesamt (Destatis) (2009): Öffentliche Wasserversorgung und Abwasserbeseitigung 2007; Fachserie 19 Reihe 2.1.; Wiesbaden: Statistisches Bundesamt
- Statistisches Bundesamt (2009): Warenverzeichnis für die Außenhandelsstatistik. (www.destatis.de)
- Statistisches Bundesamt Deutschland (DeStatis) (2008): Umwelt – Abfallentsorgung. Fachserie 19, Reihe 1. Wiesbaden
- Stiller, H. (1995): Materialintensitätsanalysen von Transportleistungen (2). Binnenschifffahrt. Wuppertal Papers 41. Wuppertal: Wuppertal Institut
- SWICO (2009): 8 Millionen alte Handys warten in der Schweiz aufs Recycling. Medienmitteilung vom 01.04.2009, Zürich
- Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry 6th ed. (2007) Wiley-VCH, Weinheim
- UNEP – United Nations Environment Programme (2010): Recycling of "Specialty Metals" - Key to Boom in Clean-Tech Sector, From Solar and Wind Power to Fuel Cells and Energy Efficient Lighting. Pressemitteilung. New York, 13.05.2010. <http://www.unep.org/Documents.Multilingual/Default.Print.asp?DocumentID=624&ArticleID=6564&I=en> (11.11.2010)
-

- UNEP (1991): Environmental Aspects of Selected Non-Ferrous Metals Ore Mining: A Technical Guide. United Nations Environment Programme, Industry and Environment Programme Activity Centre, Technical Report Series 5
- United Nations University (2008): Review of Directive 2002/96 on Waste Electrical and Electronic Equipment. Final Report. Bonn
- USGS (2009): Mineral Commodity Summaries (metall specific editions). U.S. Geological Survey, January 2009
- Von Rozycki, C.; Koeser, H.; Schwarz H. (2003): Ecology Profile of the German High-speed Rail Passenger Transport System ICE. In: International Journal of Life Cycle Assessment, 8(2), pp. 83-91
- Wäger P.; Lang D.; Bleischwitz R.; Hagelüken C.; Meissner S.; Reller A.; Wittmer D. (2010): Rare metals – Raw materials for technologies of the future. Swiss Academy of Engineering Sciences, Zurich
http://www.satw.ch/publikationen/schriften/SelteneMetalle_kurz_EN.pdf (07.01.2011)
- Weiland-Wascher, A.; Wuttke, J. (2007): Elektroaltgeräte – Abfall oder Produkt?! In: Müll & Abfall, Ausgabe 09/2007, pp. 440 – 442
- Wilts, H. (2009): Erweiterte Produzentenverantwortung – Chancen und Grenzen. Institutionen ökologischer Nachhaltigkeit. Normative und institutionelle Grundfragen der Ökonomik. 9.-11. 3. 2009, Tutzing
- Wuppertal Institute (2003): Overview on materials and energy sources (Material Intensity Factors), version 2
http://www.wupperinst.org/en/info/entwd/index.html?beitrag_id=437&bid=169
(20.12.2010)
- Yu, J.; Williams, E.; Ju, M.; Yang, Y. (2010) Forecasting Global Generation of Obsolete Personal Computers. Environmental Science & Technology